

ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Выпуск 31 (74) 2023



СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник
научных трудов
Донбасского государственного технического
института**

Сборник
Выходит 4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 31 (74) 2023

Collection of Scientific Papers of DonSTI

Collection
Publishing 4 times a year
Founded in June 1999
Issue 31 (74) 2023

Алчевск
2023

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 31 (74) 2023

**Основатель:
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»**

*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
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»
(Протокол № 5 от 23.06.2023)*

Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84½
Усл. печат. л. 13,5
Заказ № 114
Тираж 100 экз.

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

Адрес редакции, издателя и основателя:
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»
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

Вишневецкий Д. А. — д.т.н., доц., ректор

Заместитель главного редактора

Смекалин Е. С. — к.т.н., доц.,
проректор по научной работе

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.

Артюх В. Г. — д.т.н., проф.

Зинченко А. М. — к.э.н., доц.

Снитко С. А. — д.т.н., проф.

Куберский С. В. — к.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.

Давиденко А. И. — 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.

© ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2023

© Чернышова Н. В., художественное
оформление обложки, 2023

НАУКИ О ЗЕМЈЕ

GEOSCIENCES

УДК 622.276.346.2

Смекалин Е. С., *Кулакова С. И., Павлов В. И.
Донбасский государственный технический университет
*E-mail: kulakova_si@mail.ru

МЕТОДИКА ШАХТНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ И УГЛЕДОБЫЧИ НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ

Разработана методика шахтных наблюдений за процессами угледобычи механизированными комплексами, формирования метанообильности и геомеханическими процессами в выработанном пространстве. Предложена оценка интенсивности геомеханических процессов показателями акустической эмиссии, регистрируемой аппаратурой ЗУА-98. Обоснованы характеристики временных рядов, отражающие особенности процессов метановыделения в шахтных условиях.

Ключевые слова: методика, угледобыча, механизированный комплекс, технологические процессы, метанообильность, геомеханические процессы, акустическая эмиссия, параметры временных рядов.

На газоносных пластах техническая производительность современных механизированных комплексов ограничивается требованиями газовой безопасности и регламентируется в условиях Донбасса Руководством по проектированию вентиляции угольных шахт [1], со времени ввода в использование которого прошло почти 30 лет. За это время производительность выемочной техники возросла более чем в 2 раза, глубина ведения горных работ достигла 900–1400 м и, соответственно, усилились метановыделение и проявления горного давления, в связи чем возникла необходимость пересмотра отдельных положений руководства, что признается ведущими специалистами в этой области [2, 3].

Исследования метановыделения как случайного процесса заложили предпосылки обоснования технической производительности механизированных комплексов на новом принципе, заключающемся в текущем планировании добычи угля в процессе отработки выемочного участка в соответствии с изменяющейся газовой обстановкой [3]. Использование методов исследования случайных процессов [4] требует подготовки принципиально новой базы исходных данных в виде временных рядов с соблюдением ряда специальных условий.

Цель работы — обосновать методику шахтных инструментальных исследований процессов выемки угля и формирования метанообильности очистного забоя, обеспечивающую подготовку исходных данных для выявления закономерностей взаимного влияния этих процессов методами теории временных рядов.

В работе решаются следующие **задачи**:

- определение перечня процессов, влияющих на производительность механизированных комплексов, методов и оборудования для проведения шахтных наблюдений;
- обоснование характеристик временных рядов, отражающих взаимное влияние процессов выемки угля и метановыделения.

Процесс выемки угля вызывает развитие геомеханических процессов и формирование метанообильности очистного забоя. Изменение во времени метанообильности формируется из двух процессов: метановыделения из призабойного и выработанного пространств. Процесс метановыделения из призабойного пространства задается неравномерностью выполнения очистных работ во времени. Метановыделение из выработанного пространства формируется под воздействием геомеханических процессов в подрабатываемом массиве. Поэтому исследованию подлежат взаимосвязи между

этими процессами. Исходными данными для анализа являются временные ряды, сформированные по каждому процессу, — числовые последовательности через равные промежутки времени (интервалы) показателей процесса достаточно большой общей продолжительности (длины ряда). Методика сбора данных должна обеспечивать следующие характеристики временных рядов: одинаковые длины, интервалы, непрерывность по всей длине, одинаковую датировку рядов (сопряженность во времени). Кроме того, должна быть обоснована максимальная длина ряда и его минимальный интервал дискретизации.

Длина ряда должна обеспечивать возможность определения низкочастотной составляющей процесса с наибольшим периодом. За основу принимается период подвигания очистного забоя между осадками основной кровли:

$$T_o = \frac{Ш_o}{v_{оч}}, \quad (1)$$

где $Ш_o$ — шаг осадки основной кровли при отработке выемочного участка, м;

$v_{оч}$ — среднесуточное подвигание очистного забоя, м/сут.

Согласно рекомендациям Института горного дела им. А. А. Скочинского, длина ряда должна составлять 5–10 периодов осадок основной кровли.

Минимальный интервал временных рядов, согласно теореме Котельникова [4], рассчитывается по формуле:

$$\Delta t = \frac{1}{2 \cdot f_c}. \quad (2)$$

Максимально возможная частота f_c высокочастотного спектра задается технологической цикличностью с периодом, равным продолжительности снятия одной полосы угля в очистном забое [5]. В условиях шахты «Молодогвардейская» средняя длительность снятия одной полосы по плану k_2 составляет 2 часа. Тогда максимальная частота частотного спектра процесса

метановыделения составит $f_c = 0,5 \text{ ч}^{-1}$, а минимальный интервал ряда, рассчитанный по формуле (2), будет равен $\Delta t = 1$ час.

С другой стороны, для текущего планирования рациональным является суточный объём добычи, так как реализация плана обеспечивается минимальным временем технической подготовки (одной ремонтной сменой). Обоснование текущей суточной нагрузки возможно при прогнозе среднесуточной метанообильности за суточный период и оценке отклонения от среднего часовых значений. Таким образом, минимальный интервал временного ряда в 1 час обеспечит необходимую информативность в высокочастотном спектре.

Методика шахтных инструментальных исследований состоит из 3-х частей.

Часть 1. Контроль метанообильности.

За показатель процесса метановыделения в данной работе принимается скорость выделения метана ($\text{м}^3/\text{мин}$). В некоторых исследованиях [3] расчетный показатель метанообильности считается менее точным, чем измеряемая концентрация метана. С нашей точки зрения метанообильность, как показатель скорости процесса, больше способствует пониманию физической сущности самого процесса, чем уровень концентрации.

Применяемая аппаратура газовой защиты (АГЗ) позволяет подготовить исходный временной ряд концентрации метана с достаточно малым интервалом дискретизации и любой длительности. Однако одно и то же значение концентрации может свидетельствовать о разных объёмах выделившегося метана при изменении количества воздуха в выработке. Изменение расхода воздуха происходит по разным причинам: открытие и закрытие вентиляционных дверей, изменение сечения и длины выработок, загромождение выработок материалами и оборудованием и т. п., поэтому коэффициент вариации расхода воздуха в выработке может достигать 24–28 %. Автоматический контроль расхода воздуха по выработке осуществляется с помощью измерителя скорости движения воздуха

ИСВ-1 или стационарным комплексом «Воздух». Для контроля процесса метанообильности необходимо вести одновременно регистрацию показаний скорости воздуха и концентрации в нем метана.

Часть 2. Контроль угледобычи. Для регистрации интенсивности процесса выемки угля необходимо разработать специальный методический подход, так как добыча в шахтной документации отражается излишне укрупненно. В горных журналах через каждые десять дней по всей длине лавы геологической службой фиксируется средняя вынимаемая мощность пласта и объемный вес угля, маркшейдерской службой — площадь выемки. По полученным данным рассчитывается декадный объём добычи угля. Информация о сменной добыче фиксируется в участковой нарядной документации.

Для целей исследований необходима более детальная информация по добыче, поэтому предложена специальная методика контроля текущей добычи из очистного забоя на основе хронометражных круглосуточных наблюдений за положением комбайна в лаве и оценки производительности вынимаемого пласта. Регистрация положения комбайна в лаве производится по номерам секций механизированной крепи через принятый временной интервал. По длине вынимаемой полосы производятся замеры мощности угольных и пластовых породных пачек.

Пример заполнения результатов сменного хронометража с часовым интервалом при 6-часовой смене приведен в таблице.

В таблице приняты следующие обозначения:

N_n, N_k — номера секции механизированной крепи соответственно на начало и конец временного интервала ряда;

t — периодичность контроля положения комбайна (принятый интервал временного ряда), $t = 1$ ч;

m_y, m_n — замеры мощности угольных и породных пачек на длине участка лавы, где произошла выемка угля, м.

Текущее значение ряда (добыча за принятый временной интервал ряда) рассчитывается по формуле:

$$A = (N_n - N_k) \cdot b \cdot p, \quad (3)$$

где b — шаг расстановки секций крепи по длине лавы, м;

p — средняя производительность угольного пласта на длине лавы между номерами секций N_n и N_k :

$$p = \frac{\sum m_y \gamma_y + \sum m_n \gamma_n}{n}, \quad (4)$$

где γ_y, γ_n — плотность соответственно угля и породных пачек;

n — количество замеров мощности пласта.

Таблица

Пример заполнения таблицы сменного хронометража с часовым интервалом

Дата	Смена	Показатели	Положение комбайна в лаве по номерам секций						
			1	2	3	4	5	6	
1-я добычная	t								
	N_n		17	17	25	28	28	36	
	N_k		17	25	28	28	36	36	
	$N_n - N_k$		0	8	3	0	8	0	
	продолжительность отключения электроэнергии АГЗ, мин		0	10	8	10	22	15	
	m_y		0,8	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	
			0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,3	
			0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	
	m_n		0,1	0,15	0,2	0,15	0,15	0,1	
			0,2	0,1	0,05	0,20	0,15	0,2	

Часть 3. Контроль геомеханических процессов. Последовательное изменение интенсивности геомеханического процесса принято представлять динамикой опусканий кровли в очистном забое по мере его подвигания. Замеры опусканий кровли весьма трудоемки и не автоматизированы. С 1989 года на угольных шахтах используется контроль интенсивности геомеханических процессов в окрестности очистного забоя датчиками акустической эмиссии с целью прогноза выбросоопасности угольного пласта. В данной работе предлагается использовать показатель акустической эмиссии для представления геомеханического процесса временным рядом. Регистрация сейсмоакустической активности производится с помощью звукоулавливающей аппаратуры типа ЗУА-98 (рис. 1).

Пьезокерамический датчик приема акустических сигналов СПД-1Д устанавливается в шпурах, пробуренных в кровлю, или на контакте верхняка крепи подготовительной выработки с породами кровли. По данным ш. «Молодогвардейская», дальность качественного приема сигналов при категориях кровли А₃₋₄, Б₄₋₅ составляет 116 м. Дальность акустического контроля с учетом запаса расстояния на перестановку датчиков с шагом 20 м составляет 65–75 м, чего достаточно для регистрации процессов образования сводов обрушений в выработанном пространстве.

Из приведённого следует, что для обоснования математической модели текущего планирования добычи в очистном забое необходимы исходные данные в виде временных рядов добычи, метанообильности и акустической эмиссии.

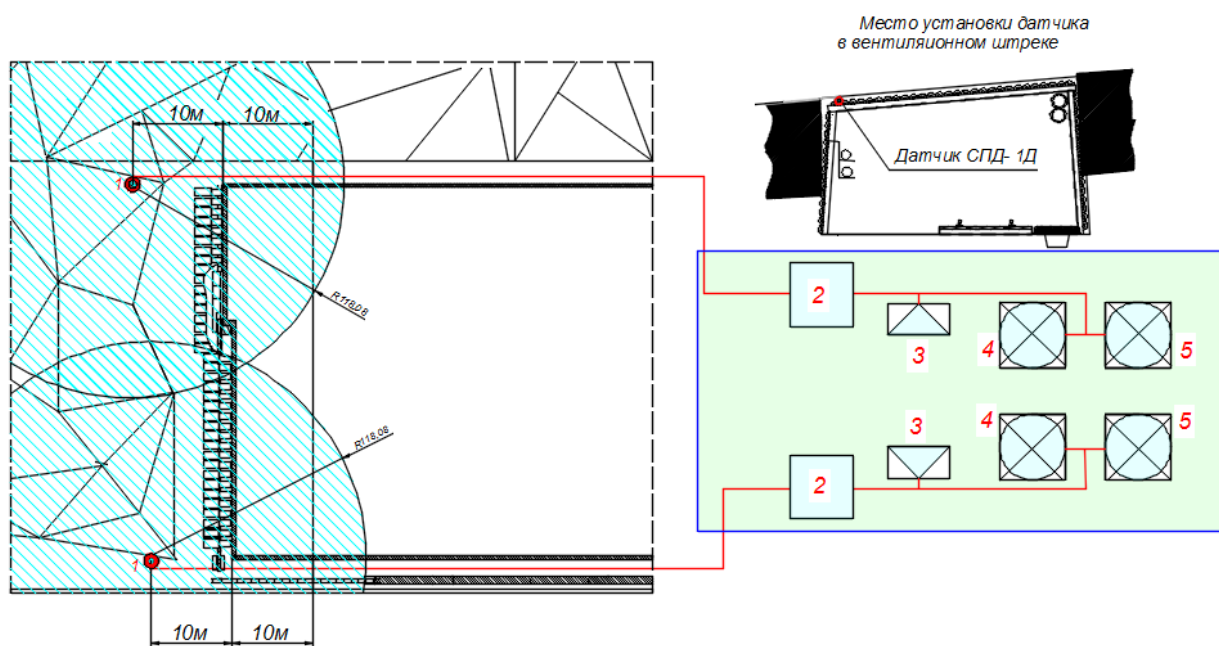


Рисунок 1 — Монтажная схема звукоулавливающей аппаратуры ЗУА-98

Выводы. Использование методов теории временных рядов в анализе процессов горного производства обуславливает требования к подготовке и сбору исходной базы данных по каждому объекту исследований, заключающиеся в следующем:

- минимальная продолжительность наблюдений за процессом (длина временного ряда) принимается равной пятикратной длине шага обрушения основной кровли;
- периодичность съёма информации (интервал дискретизации процесса или мини-

мальный интервал временного ряда) рассчитывается по теореме Котельникова, исходя из максимальной частоты частотного спектра, определяемой по средней продолжительности снятия одной полосы угля комбайном;

– возможность исследования геомеханических процессов определяется дальностью приема сейсмоакустической эмиссии по породам кровли.

Библиографический список

1. ДНАОТ 1.1.30-6.09.93. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт : утв. Приказом Гос. ком. Украины по надзору за охраной труда № 131 от 20.12.1993. К. : Основа, 1994. 312 с.
2. Касимов О. И., Бокий Б. В., Назимко И. В. Метановыделение в очистные выработки угольных шахт // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2007. № 1. С. 232–238.
3. Медведев В. Н., Азбель М. Д. Концепция развития мониторинга содержания метана в шахтной атмосфере // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах : сб. науч. тр. МакНДМ. Макеевка : Донбасс, 2017. № 1 (36). С. 5–16.
4. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М. : Мир, 1990. 584 с.
5. Кулакова С. И., Павлов В. И. Спектральный анализ процесса метановыделения при повышении нагрузки на очистной забой // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2020. № 18 (61). С. 35–41.

© Смекалин Е. С., Кулакова С. И., Павлов В. И.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г., директором ООО «ПКФ „Геолсервис“» Крамаренко А. А.

Статья поступила в редакцию 24.04.2023.

PhD in Engineering Smekalin E. S., *Kulakova S. I., PhD in Engineering Pavlov V. I. (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation, *kulakova_si@mail.ru)

METHODOLOGY FOR MINE INSTRUMENTAL STUDIES OF METHANE RELEASE AND COAL MINING PROCESSES AT EXCAVATION SITES

A mine observation technique is developed for coal mining processes by mechanized complexes, methane abundance formation and geomechanical processes in the worked-out area. An assessment of the intensity of geomechanical processes by acoustic emission indicators recorded by the ZUA-98 equipment has been proposed. The characteristics of time series reflecting the peculiarities of methane release processes in mine conditions are substantiated.

Key words: methodology, coal mining, mechanized complex, technological processes, methane abundance, geomechanical processes, acoustic emission, time series parameters.

References

1. ДНАОТ 1.1.30-6.09.93. Guidelines for coal mine ventilation design [Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт]. Kiev: Osнова, 1994. 312 p. (rus)
2. Kasimov O. I., Bokiy B. V., Nazimko I. V. Methane release into coal mines [Метановыделение в очистные выработки угольных шахт]. UkrNDMI NAN Ukraine. 2007. No. 1. Pp. 232–238. (rus)
3. Medvedev V. N., Azbel' M. D. The concept of the development of monitoring the content of methane in the mine atmosphere [Концепция развития мониторинга содержания метана в шахтной атмосфере]. Spособы i sredstva sozdaniya bezopasnyh i zdorovyh uslovij truda v ugol'nyh shahtah: sb. nauch. tr. MakNII. Makeevka: Donbass, 2017. No. 1 (36). Pp. 5–16. (rus)
4. Marpl S. L. Digital spectral analysis and its applications [Цифровой спектральный анализ и его приложения]. Moscow: Mir, 1990. 584 p. (rus)

5. Kulakova S. I., Pavlov V. I. Spectral analysis of the methane release process with increasing load on the slope [Spektral'nyj analiz processa metanovydeleniya pri povyshenii nagruzki na ochistnoj zaboj.] Scientific work collection of DonSTU. 2020. No. 18 (61). Pp. 35–41.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Смекалин Евгений Сергеевич, канд. техн. наук, доцент каф. строительных геотехнологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Кулакова Светлана Ивановна, ст. преп. каф. высшей математики
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: kulakova_si@mail.ru

Павлов Валерий Иванович, канд. техн. наук, доцент каф. экологии и безопасности
жизнедеятельности
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

**МЕТАЛЛУРГИЯ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCES**

УДК 621.771.2

¹Яковченко А. В., ¹Денищенко П. Н., ^{1,*}Кравцова С. И., ^{2,}Пилипенко В. В.**¹Донбасский государственный технический университет,²Донецкий национальный технический университет

E-mail: *kravtsovsveta@gmail.com, **dvenaxa94@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОКАТКИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОЛОСОБУЛЬБОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПО СТУПЕНЧАТОЙ КАЛИБРОВКЕ НА СОВРЕМЕННЫХ СТАНАХ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ КЛЕТЕЙ

Выполнена адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки несимметричного полособульбового профиля в ступенчатом калибре. При нарушении условия равенства вытяжек по полке и стенке профиля имеют место серповидный изгиб переднего конца раската в сторону полки и нестабильность размеров профиля, а также возможно образование дефектов. Показано, что обеспечение равенства вытяжек даёт прямолинейный выход раската из очага деформации, а также получение стабильных размеров профиля, что облегчает передачу полос из калибра в калибр и способствует производству несимметричных полособульбовых профилей на современных прокатных станах с последовательным расположением клетей.

Ключевые слова: прокатка несимметричного полособульбового профиля, серповидный изгиб раската, вытяжка, конечно-элементное моделирование, прокатные станы с последовательным расположением клетей.

Несимметричные полособульбовые профили, прокатываемые из низколегированных конструкционных сталей, предназначены для судостроения. Известно [1–4], что сложности прокатки указанных профилей в основном связаны с большой разницей в толщине элементов профиля (полки и стенки). В результате наблюдается неустойчивое положение раската в валках, что приводит к продольному скручиванию и серповидному изгибу его переднего конца в процессе прокатки.

Производство несимметричных полособульбовых профилей в основном осуществляется на устаревших станах линейного типа, на которых после каждого пропуска меняется направление прокатки на противоположное, что облегчает условие задачи полосы в следующий калибр. Повышение устойчивости процесса прокатки и точности размеров переходных сечений профиля является актуальной задачей, решение которой позволит расширить возможности эксплуатации современных прокатных станом с последовательным расположением клетей, в том числе и непрерывных.

Анализ известных систем калибровок (полосовой, полосоугловой, желобчатой, корытной), применяемых для прокатки несимметричных полособульбовых профилей, свидетельствует, что проблема устойчивости металла в калибрах является характерной для каждой из них. Решается она, главным образом, путем повышения жесткости промежуточных сечений, которая достигается ориентацией калибров относительно оси валков и характерной для каждой системы конфигурацией фасонных калибров. Корытная система отличается более высокими показателями работы прокатных станом. Способы прокатки и методы расчёта калибровки полособульбовых профилей наиболее полно разработаны Д. И. Старченко в работах [2, 3].

Однако и корытная система не гарантирует достаточной стабильности процесса прокатки, то есть является «чувствительной» к отклонениям, прежде всего, такого фактора, как зазоры между валками. Так, в процессе формовки на её основе элементов несимметричного полособульбового профиля неравномерная деформация металла в

В процессе моделирования использовали автоматический режим генерации конечно-элементной сетки с четырехузловыми тетраэдрами, имеющими размеры в диапазоне 0,7–2,1 мм (рис. 2). Это позволило адекватно описать геометрию полосы до, в процессе и после деформирования, а также исключить пробуксовку валков, связанную с занижением фактической площади контакта металла с валками, которое имеет место при использовании конечных элементов большего размера. Ниже показано, что дальнейшее измельчение сетки нецелесообразно, поскольку приводит к существенному повышению времени моделирования, не обеспечивая уточнение получаемых результатов расчета.

Моделирование выполняется для нестационарного теплового режима раската с учетом процессов теплообмена обрабатываемого металла с окружающей средой при деформации, а также с учетом теплового эффекта пластической деформации.

Моделирование процесса теплообмена выполнено на основе известной зависимости:

$$q = A\alpha(t_s - t_c), \quad (1)$$

где q — тепловой поток;
 A — площадь поверхности, на которой происходит теплообмен;
 α — коэффициент теплообмена;
 t_s, t_c — температура поверхности металла и окружающей среды соответственно.

Температура окружающей среды и коэффициент α были приняты постоянными и равными 20 °С и 100 Вт/(м²·°С) соответственно. Коэффициент теплопередачи на контакте раската с валками равен 5000 Вт/(м²·°С). Температура валков принята постоянной и равной 50 °С, температура задаваемого в калибр подката равнялась 1070 °С.

Для подката использовали пластическую модель материала. В качестве материала использовали конструкционную сталь 0,18С–0,27Si–0,85Mn, для которой параметры, характеризующие теплофизические свойства, взяли из базы данных Deform-3D.

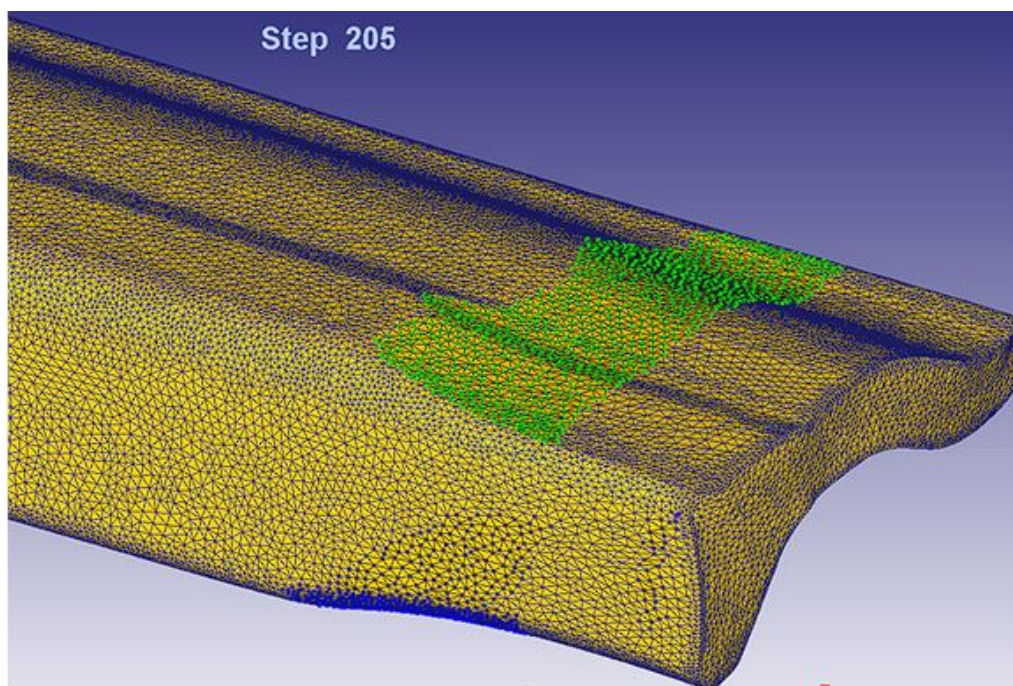


Рисунок 2 — Визуализация сетки конечных элементов до, в процессе и после деформирования несимметричного полособульбового профиля по ступенчатой калибровке

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Для валков была выбрана модель недеформируемого материала. Расстояние между осями валков 400 мм. Скорость прокатки металла в ступенчатом полосульбовом калибре принята постоянной — 4,4 м/с.

Поведение металла в процессе решения описывалось диаграммой «эквивалентное напряжение течения — эквивалентная деформация». При моделировании металл деформировался пластически, а сумма напряжений определялась в зависимости от пошаговой суммы деформаций по кривой течения.

Расчет напряжения течения металла выполнялся с учетом накопленной деформации, а также процессов динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке по методу [7]. На базе метода [8]

выполнен расчет уточненных констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла, которая приведена в правой части окна компьютерной программы, показанного на рисунке 3. Уточненные константы показаны в правой части окна программы под компонентом «Выполнить».

Определена средняя относительная погрешность (6,8 %) при расчете напряжения течения металла по отношению к экспериментальной информации [8], которая имеется в диапазоне изменения степени деформации от 0,05 до 0,69. В нижней части окна программы показаны удовлетворительные результаты проверки адекватности модели с помощью критерия Фишера.

Метод, уточняющий параметры формулы Солода В.С. и др.

Пределы изменения факторов

ε_{min}	ε_{max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.051	2.5	0.5	50	900	1200

Расчет напряжения течения металла

по экспериментальным кривым упрочнения

Химический состав [%]

Наименование	0.18C-0.27Si-0.85Mn
C (0.05 - 1.1)	0.18
Si (0 - 1.65)	0.27
Mn (0.03 - 1.55)	0.85
Cr (0 - 0.3)	0.3
Ni (0 - 0.3)	0.3
P (0 - 0.05)	0.025
S (0 - 0.05)	0.025
V (0 - 0.25)	
Cu (0 - 0.28)	

по формулам Солода В.С. и др.

Выполнить

n1	m1	n2	m2	n3	m3	n4	m4
72.06	0.131	51.66	0.149	0.193	0.112	0.268	0.107

по уточненным параметрам формулы Солода В.С. и др.

Начальные параметры

n1	m1	n2	m2	n3	m3	n4	m4
72.265800	0.118313	60.889880	0.128282	0.328746	0.068079	0.519676	0.080813

Выполнить

Новая итерация

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{эксп.}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.1079	4.886	926.584	106.851
2	+1	-1	-1	0.6361	4.886	926.584	155.357
3	-1	+1	-1	0.1079	45.614	926.584	143.499
4	+1	+1	-1	0.6361	45.614	926.584	212.759
5	-1	-1	+1	0.1079	4.886	1173.416	48.039
6	+1	-1	+1	0.6361	4.886	1173.416	71.954
7	-1	+1	+1	0.1079	45.614	1173.416	75.079
8	+1	+1	+1	0.6361	45.614	1173.416	104.106
9	-1.2154	0	0	0.051	25.250	1050.000	80.020
10	+1.2154	0	0	0.693	25.250	1050.000	135.285
11	0	-1.2154	0	0.3720	0.5	1050.000	68.009
12	0	+1.2154	0	0.3720	50	1050.000	147.053
13	0	0	-1.2154	0.3720	25.250	900	182.214
14	0	0	+1.2154	0.3720	25.250	1200	77.969
15	0	0	0	0.3720	25.250	1050.000	124.456

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)

Грanch 116.855 Грaбл 3.59 Грanch > Грaбл (адекватность обоснована)

Результаты расчета

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp \left(\frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right)$$

σ (МПа)	Δ (%)
107.756	0.847
160.349	3.213
146.912	2.379
205.676	3.329
56.699	18.027
77.463	7.656
69.781	7.057
101.012	2.972
75.006	6.266
131.685	2.676
80.297	18.068
129.830	11.712
193.609	6.254
84.697	8.629

Δ_{cp} (%) 6.796

Q 369398.373

A 57979072824546.930

Q по формуле В.С. Солода и др.
Q по формуле С.Ф. Медва и др.
Q по объединенной формуле
Усовершенствованный метод

Выполнить Дополнительно Грaвки <<Назад Далее>>

Рисунок 3 — Окно компьютерной программы расчета уточненных констант по методу [8], определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла [7] и определения средней относительной погрешности при расчете напряжения течения металла по отношению к экспериментальной информации

На рисунке 4 представлены расчетные графические зависимости напряжения течения металла от степени деформации, полученные по методу [7], которые показаны линией 1, а также полученные по методу [8], которые показаны линией 2. Экспериментальные кривые [9] показаны линией 3. Повышение точности расчетных значений напряжения течения металла по методу [8]

получено за счет использования уточненных констант, определяющих термокинетические параметры. Соответствующие кривые течения стали 0,18С–0,27Si–0,85Mn в диапазоне температур 900–1200 °С в системе Deform-3D строятся на основе базы цифровой информации о напряжении течения металла, полученной по методу [7] с учетом уточненных констант на базе метода [8].

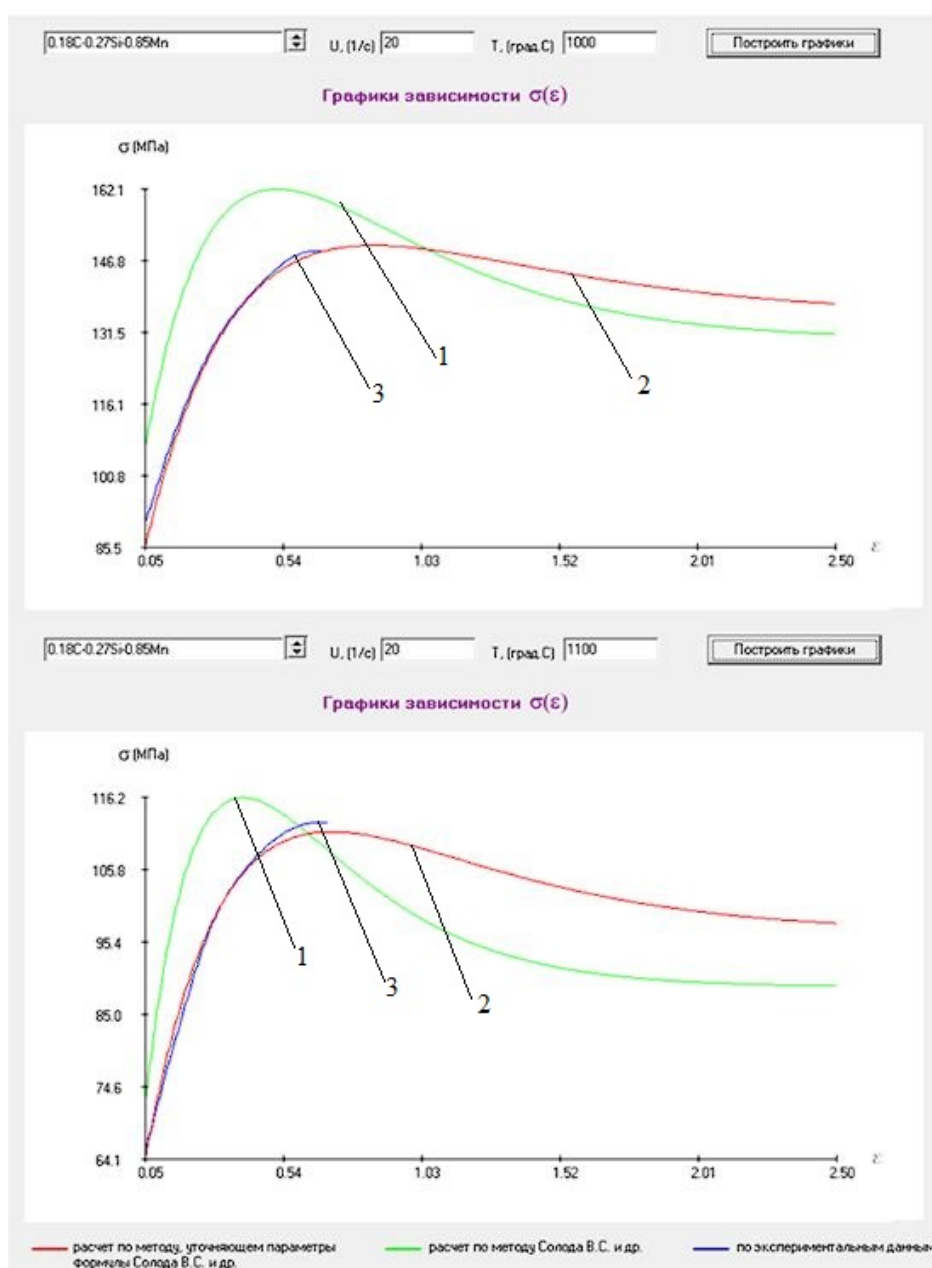


Рисунок 4 — Расчетные графические зависимости напряжения течения металла от степени деформации: 1 — полученные по методу [7], 2 — по методу [8]; 3 — экспериментальные кривые [9]

В качестве модели контактного трения принята известная сдвиговая модель Э. Зибеля:

$$\tau_{mp} = mk,$$

где τ_{mp} — напряжение трения;

m — фактор трения, для условий горячей прокатки ($m = 0,5$);

k — напряжение течения металла заготовки на сдвиг.

Моделирование процесса прокатки несимметричного полосульбового профиля в ступенчатом калибре выполняли путем решения объемной задачи с учетом влияния внешних зон и наличия установившейся стадии прокатки. В процессе решения учитывали условие непроницаемости на контакте металла с валками.

Неравномерная деформация металла в калибре, вызывающая поперечное смеще-

ние металла в очаге деформации, и осевые силы, которые стремятся сместить ручки калибра относительно друг друга, приводят к отклонению величин деформации и, соответственно, вытяжек по элементам профиля от проектных значений. В связи с этим в работе выполнено моделирование и исследование процесса прокатки в условиях, когда не выполняется равенство вытяжек по основным элементам профиля (полке и стенке), а также когда обеспечено его выполнение.

В первом случае вытяжка по стенке на 0,1 была больше, чем вытяжка по полке. Результаты моделирования процесса прокатки в случае невыполнения условия равенства вытяжек по полке и стенке полосульбового профиля представлены на рисунках 5, а и 6, а, б.

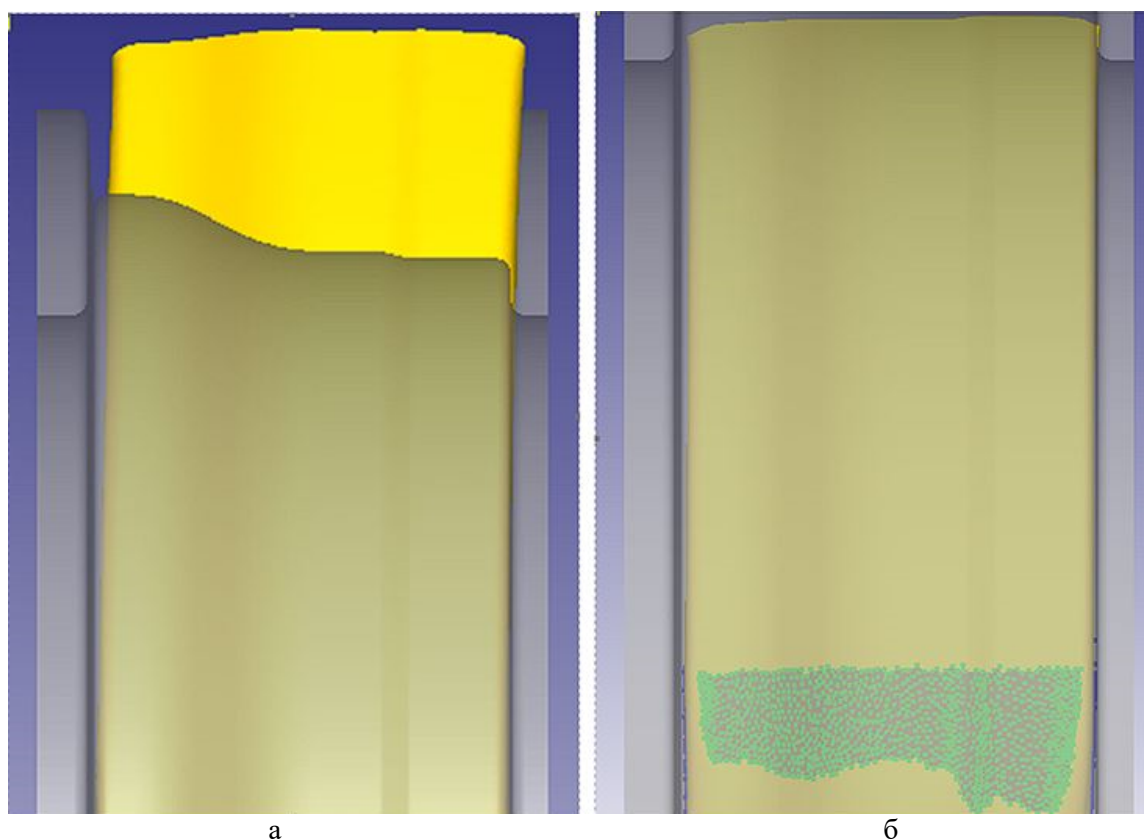
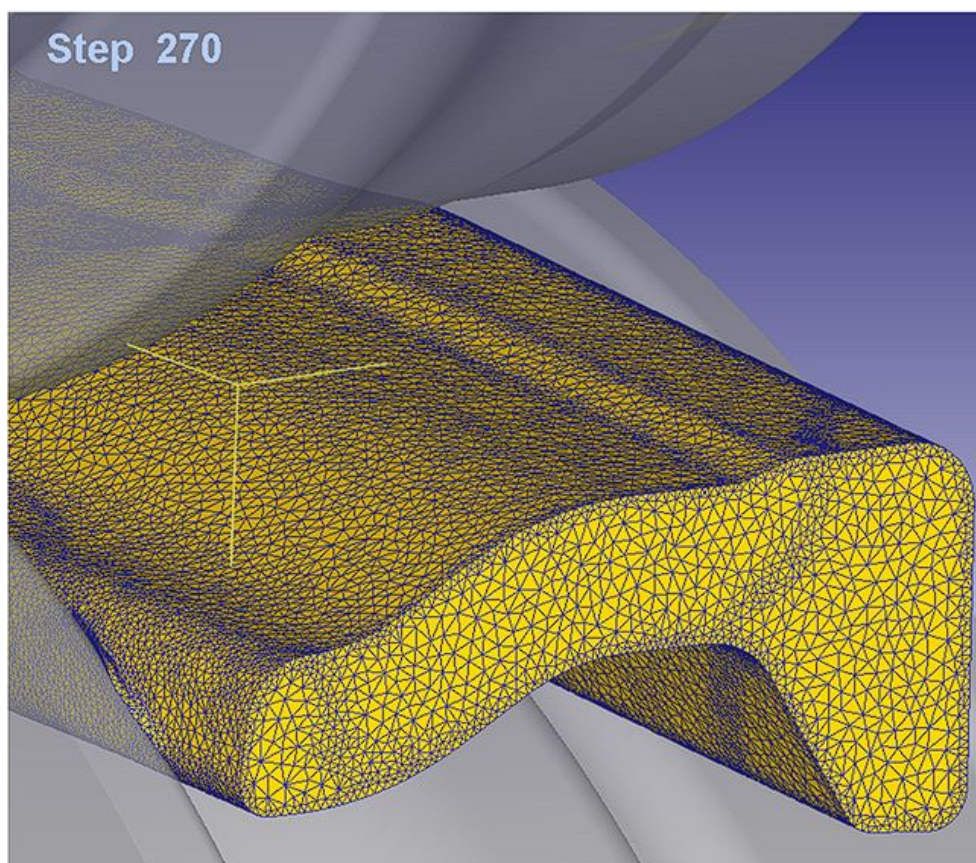
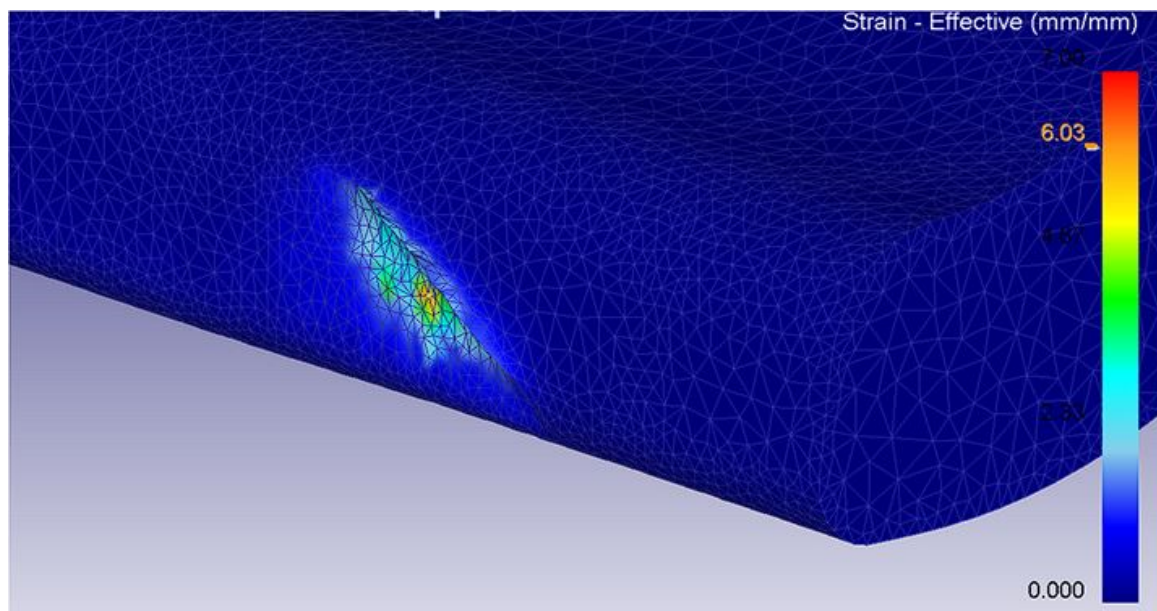


Рисунок 5 — Моделирование процесса прокатки несимметричного полосульбового профиля:
а — при серповидном изгибе раската в сторону полки;
б — при прямолинейном выходе раската из очага деформации



а



б

а — течение металла на борт калибра;
б — расчет максимальной степени деформации $\varepsilon = 6,03$ в зоне дефекта

Рисунок 6 Моделирование процесса образования дефекта

Во втором случае вытяжки по стенке и полке были равны между собой. Результаты моделирования процесса прокатки в случае обеспечения равенства вытяжек по полке и стенке полособульбового профиля представлены на рисунках 2, 5, 6, 7.

В случае невыполнения равенства вытяжек получен серповидный изгиб раската в сторону полки и нестабильность размеров профиля (рис. 5, а). При этом, в связи с неустойчивым положением раската в валах, получен перекосяк полосы в зоне её входа в очаг деформации, что привело к прижатию торца стенки полособульбового профиля к бурту калибра и течению металла на бурт калибра с образованием дефекта (рис. 6, б). Четкое формирование тонкостенного дефекта свидетельствует о достаточном измельчении сетки при конечно-элементном моделировании. Выполнен расчет максимальной степени де-

формации $\varepsilon = 6,03$ в зоне образования дефекта (рис. 6, б). Полученное значение степени деформации наглядно обосновывает необходимость в процессе конечно-элементного моделирования процесса прокатки несимметричных полособульбовых профилей учета процессов динамического преобразования структуры металла при его горячей пластической деформации. Это связано с тем, что известные методы, которые не учитывают разупрочнение металла, разработаны на базе экспериментальных данных, полученных при значительно меньшей степени деформации.

При обеспечении равенства вытяжек по полке и стенке полособульбового профиля имели место прямолинейный выход раската из очага деформации (рис. 5, б) и получение стабильных размеров профиля (рис. 2, 7).

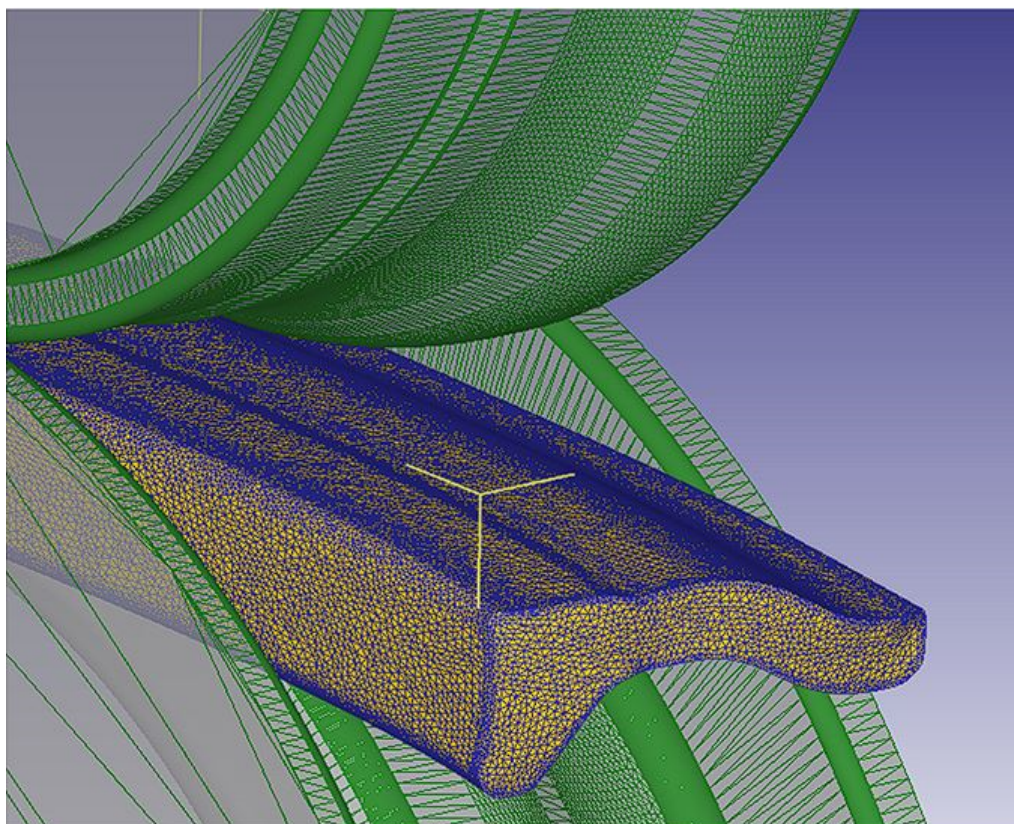


Рисунок 7 — Визуализация конечно-элементного моделирования процесса прокатки несимметричного полособульбового профиля по ступенчатой калибровке

Выводы:

1. Выполнена адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки несимметричного полособульбового профиля в ступенчатом калибре. При этом определен режим генерации конечно-элементной сетки, выбраны известные модели процесса теплообмена, а также деформируемого материала и валков, использован усовершенствованный метод расчета напряжения течения металла.

2. Установлено, что зависимость для расчета напряжения течения стали 0,18С–0,27Si–0,85Mn, разработанная на базе теории, учитывающей динамическое преобразование структуры металла при горячей пластической деформации с учетом уточненных констант, определяющих термокинетические параметры, адекватно описывает экспериментальные кривые течения и может использоваться для конечно-элементного моделирования процесса прокатки несимметричных полособульбовых профилей. Показано, что максимальная степень деформации может достигать значения $\varepsilon = 6,03$, что исключает возможность использования других методов расчета напряжения течения металла.

3. Выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки несиммет-

ричного полособульбового профиля в ступенчатом калибре. Показано, что при нарушении условия равенства вытяжек по полке и стенке профиля имеют место серповидный изгиб переднего конца раската в сторону полки и нестабильность размеров профиля, а также возможно образование дефектов. Обеспечение равенства вытяжек даёт прямолинейный выход раската из очага деформации, а также получение стабильных размеров профиля, что облегчает передачу полос из калибра в калибр и способствует производству несимметричных полособульбовых профилей на современных прокатных станах с последовательным расположением клетей.

Направление дальнейших исследований связано с конечно-элементным моделированием «чувствительности» ступенчатой калибровки несимметричных полособульбовых профилей к нарушениям в настройке стана, которые вызваны смещением верхнего ручья предшествующего калибра относительно нижнего в радиальном направлении на +2 мм и в поперечном ± 1 мм. Указанные величины смещения соответствуют максимально возможным отклонениям в реальных условиях прокатки от заданных калибровкой.

Библиографический список

1. Илюкович Б. М. *Прокатка и калибровка : справочник. Том II. Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2003. 569 с.*
2. Старченко Д. И. *Рациональные основы калибровки полособульбовой стали // ЖдМИ, Производство и обработка стали. Харьков, 1960. Вып. 5. С. 189–199.*
3. Старченко Д. И. *Теория корытной калибровки полособульбовых профилей // ЖдМИ, Производство и обработка стали. Харьков, 1960. Вып. 5. С. 200–247.*
4. Шум В. Б., Яковченко А. В. *Ступенчатая калибровка несимметричного полособульбового профиля // Металл и литье Украины. 2004. № 12. С. 25–28.*
5. *Спосіб прокатки штабобульбової сталі : пат. 67656А Україна. № В21 В1/08 ; опубл. 15.06.04, Бюл. № 6.*
6. Снитко С. А., Денищенко Н. П., Пилипенко В. В. *Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската в круглом калибре // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 23 (66). С. 32–39.*
7. Солод В. С., Бейгельзимер Я. Е., Кулагин Р. Ю. *Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей // Металл и литье Украины. 2006. № 7–8. С. 52–56.*

8. Метод уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла / А. В. Яковченко [и др.] // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2022. № 26 (69). С. 29–39.

9. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. М. : Металлургия, 1976. 488 с.

© Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Кравцова С. И.

© Пилипенко В. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ОМДМ ДонГТУ Митичкиной Н. Г., к.т.н., помощником начальника СПЦ ООО «ЮГМК» по технологии Чичканом А. А.

Статья поступила в редакцию 07.06.2023.

Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V., PhD in Engineering Denishchenko P. N., Kravtsova S. I. (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation, kravtsovsveta@gmail.com), **Pilipenko V. V.** (Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, the Russian Federation, dvenaxa94@mail.ru)

INVESTIGATION THE POSSIBILITY OF ROLLING ASYMMETRIC BULB FLAT SECTIONS BY THE INTERVAL CALIBRATION ON MODERN MILLS WITH SEQUENTIAL ARRANGEMENT OF STANDS

The adaptation of method was carried out for the finite-element modeling of rolling process of the asymmetric bulb flat section in the interval caliber. If the condition of equality of cogging backs along the shelf and the profile wall is violated, there is a crescent-shaped bend of the front end of the roll towards the shelf and instability of the section dimensions, as well as the formation of defects. It is shown that ensuring the equality of cogging backs gives a rectilinear output of the roll from the deformation focus, as well as obtaining stable profile sizes, which facilitates the transfer of strips from caliber to caliber and promotes the production of asymmetric bulb flat sections on modern rolling mills with a sequential arrangement of stands.

Key words: rolling of asymmetric bulb flat section, crescent-shaped bend of the roll, cogging back, finite-element modeling, rolling mills with a sequential arrangement of stands.

References

1. Iliukovich B. M. Rolling and calibration: a handbook [Prokatka i kalibrovka: spravochnik]. Vol. II. Dnepropetrovsk: Advertising Issuing Agency "Dnipro-VAL", 2003. 569 p. (rus)
2. Starchenko D. I. Rational basis for calibrating bulb flat steel [Racional'nye osnovy kalibrovki polosobul'bovoj stali]. ZhdMI, Proizvodstvo i obrabotka stali. Khar'kov, 1960. Iss. 5. Pp. 189–199. (rus)
3. Starchenko D. I. Theory of trough calibration of bulb flat sections [Teoriya korytnoj kalibrovki polosobul'bovyh profilej]. ZhdMI, Proizvodstvo i obrabotka stali. Khar'kov, 1960. Iss. 5. Pp. 200–247. (rus)
4. Shum V. B., Yakovchenko A. V. The interval calibration of asymmetrical bulb flat sections [Stupenchataya kalibrovka nesimmetrichnogo polosobul'bovogo profilya]. Metal and Casting of Ukraine. 2004. No. 12. Pp. 25–28. (rus)
5. Method of rolling bulb flat steel. Patent 67656A Ukraine, no. № B21 B1/08, 2004.
6. Snitko S. A., Denishchenko N. P., Pilipenko V. V. Adaptation of method of the finite-element modeling the process of the oval roll rolling in round calibre [Adaptaciya metoda konechno-elementnogo modelirovaniya processa prokatki oval'nogo raskata v kruglom kalibre]. Scientific works collection of DonSTI. 2021. Iss. 23 (66). Pp. 32–39. (rus)
7. Solod V. S., Beigelzimer Ya. E., Kulagin R. Yu. Mathematical modeling of deformation resistance during hot rolling of carbon steels [Matematicheskoe modelirovanie soprotivleniya deformacii pri goryachej prokatke uglerodistykh stalej]. Metal and Casting of Ukraine. 2006. No. 7–8. Pp. 52–56. (rus)
8. Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., Kravtsova S. I., Ivleva N. I. Method for refinement of constants determining thermokinetic parameters in the formula for calculating metal flow stress [Metod

utochneniya konstant, opredelyayushchih termokineticheskie parametry v formule rascheta napryazheniya techeniya metalla]. Scientific works collection of DonSTI. Alchevsk, 2022. No. 26 (69). Pp.29–39. (rus)

9. Polukhin P. I., Gun G. Ya., Galkin A. M. Resistance to plastic deformation of metals and alloys: a handbook [Soprotivlenie plasticheskoj deformacii metallov i splavov: spravochnik]. Metallurgy. 1976. 488 p. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковченко Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор каф. обработки металлов давлением и металловедения
Донбасский государственный технический университет,
Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: mond1991@mail.ru

Денищенко Павел Николаевич, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. обработки металлов давлением и металловедения
Донбасский государственный технический университет,
Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: pavel.denischenko@gmail.com

Кравцова Светлана Игоревна, аспирант каф. обработки металлов давлением и металловедения
Донбасский государственный технический университет
Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: kravtsovsveta@gmail.com

Пилипенко Виктор Владиславович, канд. техн. наук, старший преподаватель каф. обработки металлов давлением
Донецкий национальный технический университет,
Донецкая Народная Республика, РФ,
e-mail: dvepaха94@mail.ru

УДК 669.054:669.782

¹Проценко М. Ю., ¹Куберский С. В., ¹Завгородний С. Р., ²Анашкин А. А.¹Донбасский государственный технический университет,²ООО «Южный горно-металлургический комплекс»

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОЯ МАГНЕЗИТОВЫХ ОГНЕУПОРОВ В СОСТАВЕ ТОРКРЕТ-МАСС

В работе исследована возможность повышения стойкости футеровки кислородного конвертера, что позволяет снизить удельные затраты на огнеупоры и технологические простои, связанные с ремонтами. Для решения поставленной задачи предложено торкретирование футеровки кислородного конвертера торкрет-массой собственного производства, полученной после помола отработанных периклазовых, периклазоалюмоуглеродистых и периклазоуглеродистых огнеупоров.

Ключевые слова: футеровка, торкрет-масса, конвертер, периклазовый огнеупор, периклазоалюмоуглеродистый огнеупор, периклазоуглеродистый огнеупор, помол, жидкое стекло.

В процессе работы конвертера рабочий слой футеровки изнашивается в результате механического износа (тип огнеупоров, их качество, метод кладки, удары кусков лома при завалке его в конвертер, срыв настывлей и др.), растворения ее в шлаке (при высоком содержании в нем SiO_2), а также под действием термических напряжений. Скорость износа футеровки зависит от состава исходной шихты, сортамента выплавляемых сталей и хода процесса шлакообразования. Износ футеровки неравномерен по высоте и периметру конвертера, а наиболее сильно он проявляется в середине цилиндрической части, в так называемой зоне цапф.

Для увеличения срока службы футеровки проводятся горячие ремонты, предусматривающие подварку, торкретирование и ошлакование. При подварке в конвертере оставляют часть шлака от предыдущей плавки, имеющего высокую основность и достаточно высокую жидкоподвижность. Конвертер устанавливают таким образом, чтобы шлак заполнил места локального износа кладки, и засыпают на него бой огнеупорного кирпича. Обломки кирпича пропитываются шлаком, и эта масса затвердевает в течение 10–20 мин, после чего начинают следующую плавку. Наваренный слой в течение нескольких плавков предохраняет от износов рабочий слой.

Однако использование этого метода приводит к потерям рабочего времени, и он пригоден для ремонта только тех участков футеровки конвертера, которые находятся в плоскости его вращения.

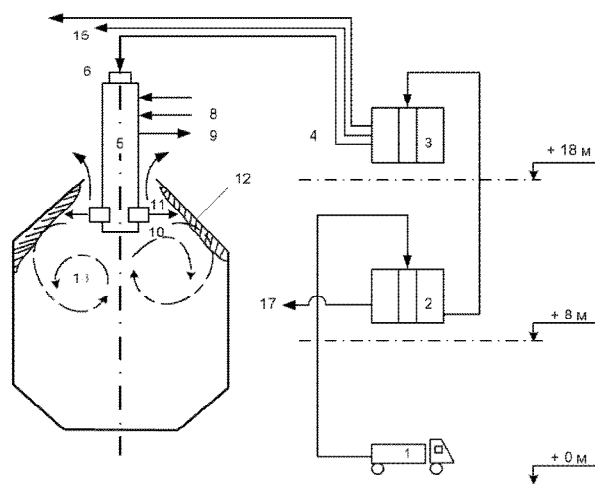
Широкое распространение получил систематический горячий ремонт футеровки путем торкретирования. Он заключается в нанесении на изношенные места кладки порошка огнеупорного материала с помощью напольной установки, называемой торкретмашиной. Иногда огнеупорный материал вдувают специальной вертикальной фурмой (вертикальное торкретирование). Различают сухое, влажное и огневое (факельное, рис. 1) торкретирование доломитовой, доломитомagneзитовой и магнетитохромитовой массами [1, 2]. Торкрет-масса должна хорошо удерживаться на изношенном месте после нанесения, свариваться с материалом футеровки и иметь достаточно высокую огнеупорность.

С целью снижения агрессивного воздействия кремнезема на огнеупорную футеровку важно снижать содержание кремния в чугуне и окиси кремния в сыпучих материалах, всемерно ускорять растворение извести и формирование активного основного шлака, а также добавлять в шлак MgO (до определенного предела), что затрудняет его переход из огнеупоров

в шлак вследствие изменений условий массопереноса. Кроме того, необходимо уделять внимание содержанию FeO в шлаке [3, 4]. Оксиды железа шлака действуют на футеровку двояко: с одной стороны, обогащение шлака FeO ускоряет растворение извести и уменьшает вредное действие кремнезема, с другой — проникновение оксида в огнеупоры способствует их износу. Аналогично оксидам железа влияет на стойкость футеровки и плавиковый шпат. Также влияние на износ футеровки оказывают колебания температуры между плавками и режим продувки.

Наиболее эффективным способом «восстановления» опережающего износа огнеупорной футеровки конвертера, как в зоне нижнего конуса, так и в других труднодоступных зонах кладки, является раздувка азотом на ее поверхность специально подготовленного конечного шлака [5, 6].

Способ раздувки конечного шлака азотом может быть использован для ремонта всей рабочей поверхности футеровки конвертера (рис. 2).



- 1 — автоцементовоз; 2, 3 — спаренные промежуточные камерные питатели;
4 — материалопровод; 5 — торкрет-фурма;
6 — трубопровод торкрет-массы; 7 — подвод кислорода; 8 — подвод воды; 9 — отвод воды;
10 — щелевые сопла; 11 — истечение струи;
12 — футеровка конвертера

Рисунок 1 — Схема комплекса оборудования для факельного торкретирования футеровки

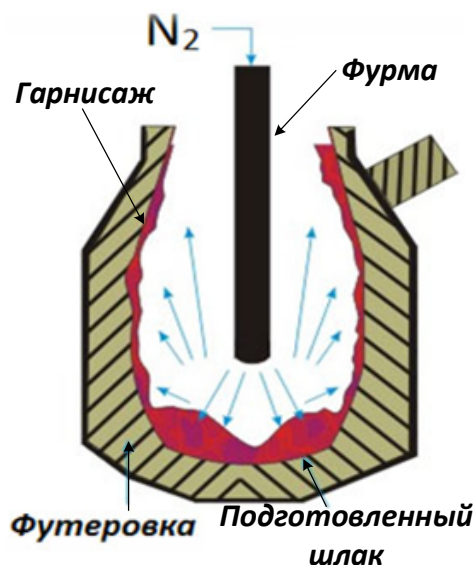


Рисунок 2 — Схема раздувки шлака на футеровку

Подача азота в конвертер осуществляется через кислородную фурму. Раздувке азотом подвергается шлак, оставшийся в конвертере после слива плавки. В зависимости от консистенции шлака в конвертер производится присадка сыпучих материалов в количестве 1,5–4,5 кг/т стали. Масса присаживаемого материала зависит от физико-химических свойств шлака и его количества, при этом шлак, налипая на футеровку, охлаждается и затвердевает, создавая прочный защитный слой, препятствующий износу огнеупоров [5].

При наличии в конвертере густого конечного шлака перед присадкой сыпучих материалов производится раздувка шлака кислородом в течение 30–40 с. Раздувка конечного шлака азотом чистотой не менее 99% осуществляется при его давлении $\geq 1,67$ МПа. Длительность операции по раздувке шлака составляет не менее 3–4 мин. Положение фурмы во время раздувки изменяется от 1,3–1,4 м до 0,9–1,0 м над уровнем жидкой ванны в три-четыре приема. Для получения равномерного по толщине шлакового покрытия всей поверхности футеровки осуществляются наклоны конвертера из стороны в сторону относительно оси, проходящей через его цапфы, на угол 15–20° [7].

Материалы, используемые в качестве модификаторов конечного конвертерного шлака, должны соответствовать определенным параметрам по фракционному составу, механической прочности, насыпной плотности, химическому и гранулометрическому составу, времени растворения [8]. От параметров подобранных модификаторов и эффективности выполнения самой операции раздувки зависят толщина и качество наносимого гарнисажного слоя. Эта величина обычно находится в пределах 15–40 мм за операцию.

На сегодняшний день существует две основные «концепции» по эксплуатации футеровки конвертера:

– первая основана на принципе постоянного ухода за футеровкой и обеспечения предельно возможного повышения ее стойкости. Ее цель — увеличение длительности рабочих кампаний конвертеров, так называемая вечная футеровка;

– вторая предполагает поддержание на максимально допустимом уровне содержания магния в шлаке за счет применения магнийсодержащих материалов.

Считается, что насыщенность шлака магнием (в пределах 9–12 %) не дает ему растворять футеровку и при надлежащем уходе способствует увеличению ее долговечности. Однако в последние годы эта тенденция несколько поменялась, что связано с удорожанием используемых в нашем регионе магнезиальных материалов.

Одним из основных критериев технологического «качества» магнезиальных материалов, наряду с химическим, является

гранулометрический состав, при этом четко регламентируется фракционный состав каждого из компонентов флюса. В качестве органических соединений могут использоваться смола или пек, этиленгликоль, бакелит, меласса и т. п., а в качестве минеральных соединений — лингосульфаты, жидкое натриевое стекло, ортофосфорная кислота, бишофит и др. Основные физико-химические параметры магнийсодержащих флюсов различных производителей представлены в таблице 1.

Особого внимания заслуживает сырье, относящееся к так называемым отходам добычи и производства доломита, магнезита и огнеупорной продукции, а также бой огнеупорного кирпича (отслужившая футеровка конвертеров, ковшей и т. д.), имеющийся в значительных количествах на каждом металлургическом предприятии.

При этом хорошо известно, что переработка и утилизация отходов, а также использование их в виде относительно дешевого сырья для металлургического производства может обеспечить значительное снижение затрат на шихту, повышение качества и конкурентоспособности, а главное, снижение себестоимости готовой продукции.

Кроме того, такой подход поможет решить экологические проблемы промышленно развитых регионов, где скопились огромные месторождения техногенных отходов, а также утилизировать текущие отходы, неизбежно образующиеся на промышленных предприятиях.

Таблица 1

Основные физико-химические параметры магнийсодержащих флюсов

Марка флюса	Химический состав, %					Прочность, МПа
	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	C	
PN-FL-60	60–62	3–5	7–9	4–5	-	≥35
Dalslag P71	70–72	1–4	6–9	1–3	2–4	≥30
SOM 60	58–62	4–7	≤	1–3	-	≥35
ФОМ	60–65	5–7	≤	7–9	-	≥30
SNC-65	65–67	7–9	≤	3–5	-	≥25
БК-4	50–55	17–20	≤8	1–3	6–7	15–18
БК-8	58–60	15–17	≤8	1–3	6–7	15–18

Ввиду отсутствия собственных магниесодержащих ископаемых и производств огнеупоров в регионе актуальной является переработка накоплений боя огнеупоров. Все эти материалы могут быть эффективно использованы в качестве удешевляющих наполнителей при производстве флюсов для металлургической отрасли. Поэтому актуальной задачей является внедрение процесса торкретирования конвертера торкрет-массой собственного производства.

Основной *целью* данной работы являлась разработка состава новой торкрет-массы собственного производства для ремонта футеровки конвертера.

Объект исследования — футеровка кислородного конвертера.

Предмет исследования — торкрет-масса для торкретирования футеровки кислородного конвертера.

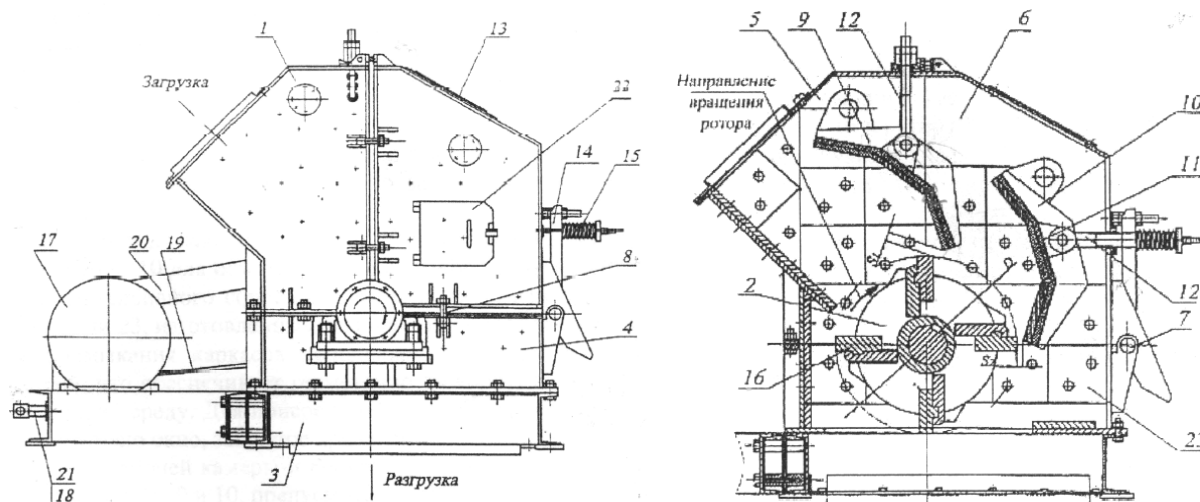
Основная *задача*, решаемая в исследованиях, заключалась в выборе эффективного состава торкрет-массы для торкретирования футеровки конвертера.

Для повышения стойкости рабочего слоя футеровки кислородного конвертера

ККЦ ООО «ЮГМК», экономии торкрет-масс и оптимизации технологии торкретирования была исследована целесообразность использования для торкрет-масс бывших в употреблении магниесодержащих изделий (периклазовые, периклазоалюмоуглеродистые и периклазоуглеродистые).

Дробление боя огнеупоров производили на роторной дробилке с диаметром ротора 400 мм и длиной рабочей части ротора 400 мм (ДР 4×4), представленной на рисунке 3.

Химический состав полученного после дробления материала определяли с использованием сканирующего рентгенофлуоресцентного спектрометра Simultix 12 и рентгеновского спектрометра ARL9900, имеющих предел измерения от 0,0001 (ppm) до 100 %, а стандартное отклонение 0,01–0,001. Химический анализ торкрет-массы представлен в таблице 2. Обработку экспериментальных данных производили на ПЭВМ с использованием стандартных пакетов прикладных программ Microsoft Excel.



1 — корпус; 2 — ротор; 3 — рама; 4 — основание; 5 — каркас неподвижный; 6 — каркас откидной; 7 — ось; 8 — болты откидные; 9, 10 — плита отражательная; 11, 23 — плита защитная; 12, 21 — винт регулировочный; 13 — крышка; 14 — упор; 15 — пружина амортизирующая; 16 — било; 17 — привод; 18 — устройство натяжное; 19 — передача клиноременная; 20 — ограждение привода; 22 — дверка

Рисунок 3 — Схема дробилки ДР 4×4

Таблица 2
Химический состав шихтовых материалов
и конечных продуктов обработки

Массовая доля, %					
Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
6,23	34,6	1,38	27,5	5,96	21,2

Анализ результатов химического состава торкрет-массы показал, что в процессе измельчения в дробилку попадают не только периклазовые, периклазохромитовые и хромитопериклазовые изделия, но и некоторое количество шамотных огнеупоров, содержащих до 28 % SiO₂.

Для исследования эффективности использования торкрет-массы, полученной из бывших в употреблении огнеупоров, были проведены предварительные плавки с нанесением торкрет-слоя на футеровку конвертера.

Технологические операции торкретирования футеровки кислородного конвертера состояли из нескольких основных этапов:

- на дробильно-измельчительной машине периклазовые, периклазоалюмоуглеродистые и периклазоуглеродистые огнеупорные изделия, бывшие в употреблении, измельчались до фракции «–5» мм;

- приготавливалась смесь жидкого стекла с водой в пропорции 1:2 до достижения плотности 1,12–1,15 г/см³. Данная смесь использовалась в качестве связующего для лучшей адгезии торкрет-массы;

- сжатым воздухом торкрет-масса, раствор жидкого стекла и воды подавались к выходу из сопла торкрет-установки где происходило их смешивание;

- слой торкрет-массы наносился на футеровку возвратно-поступательными движениями.

Результаты опытных плавки представлены в таблице 3 и свидетельствуют о том, что:

- оптимальный расход применяемой торкрет-массы на одну операцию торкретирования составляет около 520 кг, при этом достигнута наилучшая стойкость нанесенного торкрет-слоя (5 плавки);

- при визуальном осмотре отскок (скол) данной торкрет-массы от футеровки соста-

вил до 40 %, при этом установлено, что качество торкретирования зависело от наличия в массе крупных зерен (до 15 мм).

По результатам опытных плавки и оценки эффективности предложенной технологии было установлено, что:

- для полноценной замены 1 т покупной торкрет-массы необходимо применение 4 т массы собственного производства и 320 кг жидкого стекла;

- наиболее оптимальным решением является использование торкрет-массы, состоящей из 80 % покупной смеси и 20 % собственного производства.

Анализ полученных опытных данных позволил установить, что для получения 4 т торкрет-массы с наилучшими показателями качества необходимо измельчить смесь (бой магнетитовый — 2,0 т, или 46,3 %, и бой периклазоуглеродистый — 2,0 т, или 46,3 %) до фракции «–5» мм и добавить жидкое стекло в количестве 0,32 т (7,4 %).

Экономическая эффективность от частичной замены (до 20 %) торкрет-массы LR-XBL-80 массой собственного производства составляет около 18 тыс. руб/т.

Проведенные исследования показали возможность использования боя магниесодержащих огнеупоров для изготовления торкрет-масс, наносимых на рабочий слой футеровки конвертера с целью повышения его стойкости. Реализация предложенной технологии в производственных условиях показала высокую эффективность при коэффициенте замены торкрет-массы LR-XBL-80 на массу собственного производства 1:4, а также улучшение экологии и ресурсосбережение за счет рециклинга бывшего в употреблении огнеупорного кирпича.

Таблица 3
Результаты опытных плавки

№ опыта	Расход торкрет-массы, кг	Стойкость торкрет-слоя, плавки
1	460	4
2	520	5
3	480	4
4	300	3

В ходе дальнейших исследований предполагается более качественное разделение бывших в употреблении огнеупоров перед измельчением на соответствующие группы

и исследование эффективности использования других связующих с целью улучшения свойств торкрет-массы и повышения стойкости торкрет-слоя.

Библиографический список

1. Пути достижения стойкости футеровки конвертеров более 5000 плавов / В. Ф. Дьяченко, [и др.] // *Сталь*. 2007. № 2. С. 51–53.
2. Опыт эксплуатации и комплексная технология ухода за футеровкой конвертера / В. А. Шеремет [и др.] // *Новые огнеупоры*. 2006. № 1. С. 4–7.
3. Fengjun Z. Slag splashing for protection the converter lining // *Shanghai jinshu — Shanghai Metals*. 1999. Vol. 21. №. 5. P. 40-44.
4. Выплавка стали в 370-тонных кислородных конвертерах с использованием шлакообразующих материалов, содержащих оксид магния / Р. С. Тахаутдинов [и др.] // *Черные металлы*. 2002. № 1. С. 12–14.
5. Способ нанесения гарнисажа на футеровку конвертера : пат. 2632738 Российская Федерация. № 2109072 ; заявл. 10.05.16 ; опубл. 09.10.17, Бюл. № 28. 7 с.
6. Chigwedu C. Kempken J. Using slag splashing technology for low gunning rates and even lower refractory costs // *Stahl und Eisen*. 2006. № 126 (2). Pp. 19–26.
7. Протопопов Е. В., Айзатулов Р. С., Лаврик А. Н. Исследование особенностей формирования шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 7. С. 279–282.
8. Модификатор магнезимального состава для конвертерного шлака и способ его использования : пат. 2009 107 478 Российская Федерация. № 2404262 ; заявл. 02.03.09 ; опубл. 10.09.10, Бюл. № 25. 2 с.

© Проценко М. Ю., Куберский С. В., Завгородний С. Р.

© Анашкин А. А.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТУ Должиковым В. В., заместителем начальника ЦЛК ООО «ЮГМК» Тарасовым В. Н.

Статья поступила в редакцию 20.06.2023.

PhD in Engineering Protsenko M. Yu., PhD in Engineering Kuberskiy S. V., Postgraduate Zavgorodniy S. R. (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation),
Anashkin A. A. (OOO “YuGMK”, Alchevsk, LPR, the Russian Federation)

UTILIZATION EFFICIENCY OF BREAKAGE OF MAGNESITE REFRACTORIES IN THE GUNNING BODY COMPOSITION

The article investigates the possibility of increasing the durability of lining of the oxygen converter, which reduces the specific costs of refractories and technological repair-related downtime. To solve this problem, the gunning of oxygen converter is proposed with a gunning body of its own production obtained after grinding used-on periclase, periclase-aluminum-carbon and periclase-carbon refractories.

Key words: lining, gunning body, converter, periclase refractory, periclase-aluminum-carbon refractory, periclase-carbon refractory, grinding, liquid glass.

References

1. Diachenko V. F., Zakharov I. M., Ovsianikov V. G. Ways to achieve converter lining fastness over 5000 melts [Puti dostizheniya stojkosti futerovki konverterov bolee 5000 plavok]. *Stal*. 2007. No. 2. Pp. 51–53. (rus)

2. Sheremet V. A., Kekukh A. V., Troshchiy S. V. *Operating experience and integrated maintenance technology for converter lining [Opyt ekspluatatsii i kompleksnaya tekhnologiya uhoda za futerovkoj konvertera]*. *Novye ogneupory*. 2006. No. 1. Pp. 4–7. (rus)

3. Fengjun Z. *Slag splashing for protection the converter lining*. *Shanghai jinshu — Shanghai Metals*. 1999. Vol. 21. No 5. Pp. 40–44.

4. Takhautdinov R. S., Stepanova A. A., Sarychev A. V. *Steel smelting in 370-ton BOCs using slag-forming materials containing magnesium oxide [Vyplavka stali v 370-tonnyh kislородnyh konverterah s ispol'zovaniem shlakobrazuyushchih materialov, sodержashchih oksid magniya]*. *Chernye metally*. 2002. Pp. 12–14. (rus)

5. *The method of applying the skull on the converter lining: patent 2632738 RF. No. 2109072, submitted 10.05.16, published 09.10.17, bulletin No. 28. 7 p.*

6. Chigwedu C. Kempken J. *Using slag splashing technology for low gunning rates and even lower refractory costs*. *Stahl und Eisen*. 2006. № 126 (2). Pp. 19–26.

7. Protopopov E. V., Aizatulov R. S., Lavrik A. N. *Investigation of the features of a slag scull formation on lining of the oxygen converters [Issledovanie osobennostej formirovaniya shlakovogo garnisazha na futerovku kislородnyh konverterov]*. *Metallurgical and Mining Industry*. 2002. No. 7. Pp. 279–282. (rus)

8. *Modifier of magnesia composition for converter slag and method of its use: patent 2009 107 478 RF. No. 2404262, submitted 02.03.09, published 10.09.10, bulletin No. 25. 2 p.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Проценко Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. металлургии черных металлов Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ
e-mail: mikhailu4@yandex.ru

Куберский Сергей Владимирович, канд. техн. наук, профессор каф. металлургии черных металлов Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ
e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Завгородний Сергей Романович, аспирант каф. металлургии черных металлов Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ
e-mail: s-zavgorodni@mail.ru

Анашкин Александр Анатольевич, зам. нач. по механическому оборудованию кислородно-конверторного цеха ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ
e-mail: anashkin1081@mail.ru

**СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**

**CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE**

УДК 69:624.046

¹Карапетян С. Х., ²Емец Е. В., ²Псюк В. В.¹Луганский государственный университет имени Владимира Даля,²Донбасский государственный технический университет

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ СТОЙКАХ ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЯХ ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ

Статья посвящена экспериментальному и теоретическому исследованиям работы бетона в железобетонных внецентренно сжатых элементах в условиях повторных нагружений. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния повторных нагружений и способ оценки процесса деформирования бетона сжатой зоны стоек при повторных нагружениях.

Ключевые слова: бетон, железобетон, внецентренное сжатие, прочность, деформации, малоцикловые нагружения, количество циклов нагружений, напряженно-деформированное состояние.

В строительстве одним из путей повышения эффективности, долговечности и надежности железобетонных конструкций является совершенствование методов их расчета, учитывающих как физическую нелинейность материалов, так и изменение геометрии конструкций в процессе деформирования. В большинстве случаев ряд строительных конструкций подвергается действию многократно повторных (малоцикловых) нагружений, которые нередко превышают расчетные значения. При этом разрушение конструкций может происходить вследствие малоциклового усталости, обусловленной упругопластическим деформированием бетона. Поэтому интерес к проблематике малоциклового усталости железобетона и исследование влияния малоцикловых нагружений на диаграмму деформирования бетона и напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в настоящее время являются актуальными [1]. При повторных нагружениях (в отличие от однократных) сопротивление материалов разрушению зависит от их способности сопротивляться циклическому деформированию. Поэтому разрабатываемые методы расчета должны быть построены на основе реальных диаграмм деформирования, учитывающих изменение физико-механических свойств бе-

тона и арматурной стали в зависимости от условий эксплуатации конструкции [1, 2].

Результаты экспериментальных исследований [1–4] показывают, что диаграммы деформирования бетона при повторных нагружениях изменяются (трансформируются). Это свидетельствует об изменении деформативных и прочностных свойств бетона, что в основном связано с накоплением пластических (необратимых) деформаций. Особенностью работы бетона при этом является то, что он, в зависимости от параметров (уровня, скорости, коэффициента асимметрии и количества циклов) повторных нагружений, последовательно проходит присущие ему три характерных стадии упругопластического деформирования: интенсивный выбор пластических деформаций (уплотнение бетона), условная стабилизация приращений деформаций (упругая работа бетона), ускоренный рост деформаций (разуплотнение структуры бетона). Такая закономерность деформирования сжатого бетона, как показывают опыты [2, 5], наблюдается и при испытании железобетонных внецентренно сжатых и изгибаемых элементов. Это позволяет заключить, что характер деформирования и механизм потери несущей способности железобетонных конструкций зависят от особенностей деформирования исход-

ных материалов. Однако с точки зрения оценки процессов упругопластического деформирования бетона, железобетона и выполненных из них элементов конструкций представляют интерес графики нарастания деформаций. Они отражают зависимость между деформациями и числом циклов нагружений, т. е. кинетику деформирования материала. Для оценки напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов можно также использовать кривые нарастания перемещений, которые дают возможность проанализировать закономерность изменения прогибов в зависимости от количества циклов нагружений.

Объект исследования — железобетонные конструкции в условиях многократно повторных (малоцикловых) нагружений.

Предмет исследования — прочность и устойчивость железобетонных внецентренно сжатых элементов при многократно повторных (малоцикловых) нагружениях.

Цель работы — исследование напряженно-деформированного состояния и работы бетона в железобетонных элементах при малоцикловых нагружениях.

В лаборатории кафедры «Строительные конструкции» были проведены экспериментальные исследования влияния многократно повторных (малоцикловых) нагружений высоких уровней на несущую способность внецентренно сжатых стоек, которые были разделены на три серии в зависимости от параметров нагружения: С-I (однократно нагружаемые), С-II и С-III (повторно нагружаемые) по 3 образца в каждой.

На рисунках 1 и 2 соответственно представлены кривые нарастания деформаций (кривые циклической ползучести) бетона сжатой фибры и прогибов стоек серий С-II и С-III [2].

Стойки серии С-II испытаны на базе 14-ти предварительных циклов, после которых доводились до разрушения однократным нагружением, а стойки серии С-III подвергались воздействию повторных нагружений вплоть до их разрушения.

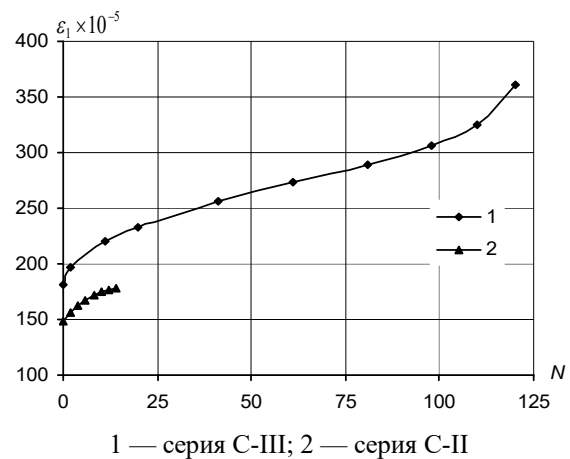


Рисунок 1 — Кривые нарастания деформаций на сжатой фибре стоек

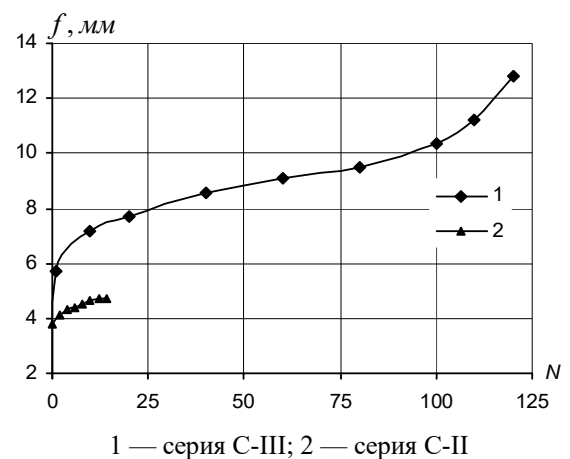


Рисунок 2 — Кривые нарастания прогибов в середине стоек в зависимости от количества нагружений

Из рисунков 1 и 2 видно, что кривые по своему характеру близки между собой и аналогичны кривым ползучести при длительном действии нагрузки и имеют характерные участки (серия С-III), соответствующие трем стадиям упругопластического деформирования бетона. Исходя из данного анализа, в кривых циклической ползучести и прогибов стоек также можно выделить характерные участки, соответствующие трем стадиям упругопластического деформирования бетона. Как видно из рисунков, нарастание прогибов и деформаций вначале происходило интенсивно с уменьшением скорости деформирования (I участок). Затем

процесс деформирования стабилизировался (условно), то есть, увеличение деформаций и прогибов происходило с постоянной скоростью (II участок). Далее интенсивность деформирования снова возрастала (до предельных значений) и приводила к чрезмерному увеличению прогибов, вследствие чего стойки разрушались (III участок). Кривые стоек серии С-II отличаются от С-III тем, что у них отсутствуют участки II и III. Это связано с тем, что они доводились до разрушения в период стабилизации роста деформаций. Необходимо отметить, что нарастание деформаций в условиях повторных нагружений в основном происходило за счет развития циклической ползучести, которая способствовала росту остаточных деформаций и прогибов стоек. Последние приводили к увеличению начального эксцентриситета приложения сжимающей нагрузки и внешнего изгибающего момента. Рост остаточных (пластических) деформаций является признаком наступления малоциклового усталости в результате постепенного накопления микроповреждений в бетоне.

Кроме того, необходимо отметить, что нарастание деформаций и прогибов, а также накопление повреждений в стойках под действием повторных нагружений происходило в основном за счет развития циклической ползучести бетона, что способствовало росту необратимых (остаточных) деформаций и прогибов после каждого снижения нагрузки до величины P_{\min}^{cyc} (нижний уровень нагружений) (рис. 1, 2). При этом следует отметить, что с нарастанием остаточных деформаций и прогибов (от цикла к циклу) стойки постепенно искривлялись (изменение геометрии стоек). Вследствие этого, начиная со второго цикла (в середине длины стоек), увеличивался и начальный (заданный) эксцентриситет приложения сжимающей нагрузки на величину остаточного прогиба (рис. 3).

Вместе с тем следует отметить, что с увеличением числа циклов нагружений и перераспределением усилий, как показал анализ экспериментальных данных, высота сжатой зоны бетона стоек (определяе-

мая по фибровым деформациям) постепенно уменьшалась (рис. 4).

Как следует из рисунка 4, кривая (наиболее характерная) изменения высоты сжатой зоны сечения стойки С-III-1 h_c-n практически является подобием (в зеркальном отображении) кривых циклической ползучести бетона стоек (рис. 1) и имеет соответствующие характерные участки. При этом кривую h_c-n также можно разбить на три участка, первый из которых характеризуется убыванием интенсивности уменьшения высоты сжатой зоны $h_c(n)$; за ним следует участок постоянной скорости уменьшения $h_c(n)$. С дальнейшим увеличением количества циклов нагружений интенсивность уменьшения высоты сжатой зоны возрастает, достигая своего минимального значения (3-й участок).

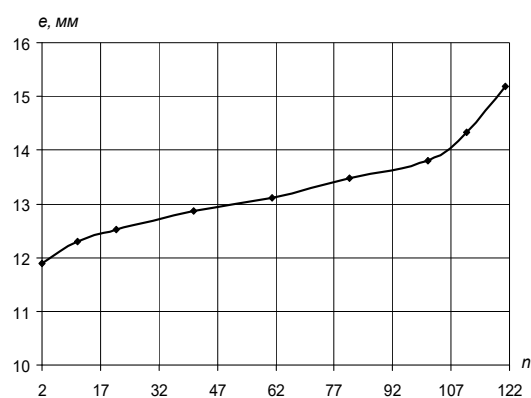


Рисунок 3 — График изменения начального эксцентриситета стоек серии С-III в зависимости от количества циклов нагружений

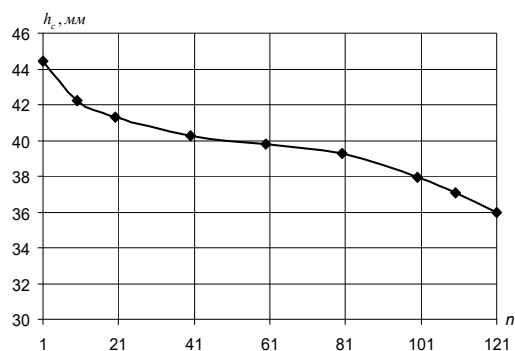


Рисунок 4 — График изменения высоты сжатой зоны стойки С-III-1 в зависимости от количества циклов

Таким образом, разрушению стоек серии С-III предшествовало резкое увеличение скорости деформирования и уменьшение высоты сжатой зоны $h_c(n)$, вследствие чего стойки в течение долей секунды исчерпывали прочность и разрушались. Сказанное иллюстрируется рисунками 1–4.

Выводы и направление дальнейших исследований. В железобетонных внецентренно сжатых элементах при немногократно повторных нагружениях бетон последовательно проходит три стадии упругопластического деформирования. Стабилизация роста деформаций бетона и прогибов стоек (приспособляемость) наступает после 5–10 циклов, что может являться

критерием для назначения количества циклов в условиях малоцикловых нагружений. Несущая способность и характер разрушения внецентренно сжатых элементов зависят от особенностей деформирования бетона при подобном характере нагружений.

В настоящее время в нормативных документах отсутствует методика расчета строительных конструкций в условиях малоцикловых нагружений. В связи с этим назрела необходимость создания единой методики расчета, учитывающей особенности изменения физико-механических свойств бетона и арматурной стали в зависимости от условий эксплуатации конструкций.

Библиографический список

1. Подобенко Т. Н. Напряженно-деформированное состояние железобетонных изгибаемых элементов при кратковременных повторных нагружениях : автореф. дис. ... канд. техн. наук. К. : НИИСК, 1991. 17 с.
2. Результаты экспериментальных исследований влияния немногократно повторных нагружений на несущую способность внецентренно сжатых стоек / Карапетян С. Х. [и др.] // Будівельні конструкції : зб. наук. праць. К. : НДБК, 2005. Т. 1. Вип. 62. С. 131–136.
3. Панчук Ю. Н., Крусъ Ю. А. Напряженно-деформированное состояние бетона при малоцикловых статических нагружениях высоких уровней // Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях : материалы международной научно-практической конференции. Сумы, 1994. С. 170–171.
4. Ставров, Г. Н., Руденко В. В., Федосеев А. А. Прочность и деформативность бетона при повторно статических нагружениях // Бетон и железобетон. 1985. № 1. С. 33–34.
5. Панчук Ю. М. Робота згинальних залізобетонних елементів зі змішаним армуванням при високих рівнях малоциклового навантаження : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львів, 1991. 17 с.

© Карапетян С. Х.

© Емец Е. В., Псюк В. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. архитектурного дизайна и строительных конструкций ДонГТУ Бондарчуком В. В., к.т.н., доц. каф. строительства и архитектуры ЛГУ им. В. Даля Усенко В. Н.

Статья поступила в редакцию 26.05.2023.

PhD in Engineering Karapetyan S. Kh. (Lugansk State University named after V. Dahl, Lugansk, LPR, the Russian Federation, karapetyanskh@gmail.com), **PhD in Engineering Emets E. V.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation, elena.emecz@yandex.ru), **PhD in Engineering Psiuk V. V.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation, psuk@rambler.ru)

STRESS-STRAIN STATE OF CONCRETE IN REINFORCED BEAM COLUMNS UNDER LOW-CYCLE LOADS OF HIGH LEVELS

The article is devoted to experimental and theoretical studies of the work of concrete in reinforced concrete non-centrally compressed elements under repeated loads.

Key words: concrete, reinforced concrete, off-center compression, strength, deformations, low-cycle loads, number of loading cycles, stress-strain state.

References

1. Podobenko T. N. *Stress-strain state of reinforced concrete bending elements under short-term repeated loading: synopsis of a thesis of PhD in Engineering [Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie zhelezobetonnyh izgibaemykh elementov pri kratkovremennykh povtornykh nagruzheniyah: avtoref. dissert. kand. tekhn. nauk]*. K.: SRISR, 1991. 17 p. (rus)
2. Karapetian S. Kh., Davidenko A. I., Ivanov A. P., Psiuk V. V. *The results of experimental studies of the effect of infrequently repeated loading on the bearing capacity of beam columns [Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy vliyaniya nemnogokratno povtornykh nagruzhenij na nesushchuyu sposobnost' vnecentrenno szhatykh stoek]*. Building structures: scientific works collection. K.: SRIBC, 2005. Iss. 62. Vol. I. Pp.131–136. (rus)
3. Panchuk Yu. N., Krus' Yu. A. *Stress-strain state of concrete under low-cycle static loading of high levels [Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie betona pri malociklovykh staticheskikh nagruzheniyah vysokih urovnej]*. Sovershenstvovanie stroitel'nykh materialov, tekhnologij i metodov rascheta konstrukcij v novykh ekonomicheskikh usloviyah: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Sumy, 1994. Pp. 170–171. (rus)
4. Stavrov G. N., Rudenko V. V., Fedoseev A. A. *Strength and deformability of concrete under repeated static loading [Prochnost' i deformativnost' betona pri povtorno staticheskikh nagruzheniyah]*. Beton i zhelezobeton. 1985. No. 1. Pp. 33–34. (rus)
5. Panchuk Yu. M. *Operation of bending reinforced concrete elements with mixed reinforcement at high levels of low-cycle loading: synopsis of a thesis of PhD in Engineering [Robota zgin'al'nih zalizobetonnih elementiv zi zmishanim armuvannyam pri visokih rivnyah malociklovogo navantazhennya : avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk]*. L'viv, 1991. 17 p. (ukr)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Карапетян Смбат Хачатурович, канд. техн. наук, доцент каф. строительства и архитектуры
Луганский государственный университет имени Владимира Даля
г. Луганск, Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: karapetyanskh@gmail.com

Емец Елена Васильевна, канд. техн. наук, доцент каф. промышленного строительства
Донбасский государственный технический университет
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: elena.emecz@yandex.ru

Псюк Виктор Васильевич, канд. техн. наук, доцент каф. промышленного строительства
Донбасский государственный технический университет
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: psuk@rambler.ru

УДК 69.022.3:002.5

¹Будзило Е. Е., ¹Горовая Н. А., ²Псюк М. Ю.¹Луганский государственный университет имени Владимира Даля,²Донбасский государственный технический университет**КОНСТРУИРОВАНИЕ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАНИЗМА ЧЕБЫШЕВА**

Работа направлена на повышение уровня механизации работ. Разработаны варианты нового оборудования с использованием механизма Чебышева, позволяющие расширить их эксплуатационные возможности.

Ключевые слова: шарнирный механизм Чебышева, управляемые механизированные инструменты, межремонтный срок эксплуатации.

В последнее время строительство, реконструкция и модернизация жилых зданий напрямую связаны с механизацией данных работ, что позволяет выполнять их качественно и в более короткие сроки.

Шарнирный механизм Чебышева является основой для разработки нового оборудования не только для возведения и реконструкции зданий, но и для предприятий производственной базы строительства. Он представляет собой плоский четырехзвенник, в котором длины звеньев подобраны таким образом, что некоторые его точки воспроизводят движение по прямой линии. Несмотря на то, что предложен он был в 1868 г., актуальность его использования не утратила своего значения и в наше время. Механизм широко используется в приборах и оборудовании для получения прямолинейного движения точки без направляющих.

С целью повышения уровня механизации ремонтных работ разработано устройство для горизонтального перемещения платформы, прошедшее государственную регистрацию и учет (№ 01840062155) [1], что значительно расширяет эксплуатационные возможности механизированного инструмента путем создания упруго-направленного примыкания рабочего инструмента к обрабатываемой поверхности.

Строительные подъемники фасадного и мачтового типов получили наибольшее распространение при ремонтных работах, так как использование строительных кра-

нов в зоне проживания людей является проблематичным.

В серийно выпускаемых подъемниках кинематическая связь между мачтой и платформой (люлькой) в основном жесткая [2, 3], что не позволяет использовать управляемые механизированные инструменты при плоскопараллельном движении рабочих органов. Подъемник с телескопической рамой имеет большую металлоемкость, так как для одних и тех же нагрузок требуется две рамы. Выдвижение платформы требует большой затраты энергии. Перечисленные выше недостатки данных устройств послужили причиной разработки нового оборудования.

Устройство предназначено для подачи груза в проем, очистки окон промышленных зданий, устройства и ремонта стыков крупнопанельных зданий, рекомендуется к применению при ремонте фасада зданий, а также при строительстве и обслуживании жилых, промышленных зданий и сооружений.

Устройство для горизонтального перемещения платформы (рис. 1) состоит из выдвижной платформы 6, шарнирно закрепленной на четырех рычагах 8, которые через концевые 2 и средние 5 тяги опираются на [-образную подъемную каретку 12. Роликоопора 4 входит в направляющие 3 мачты 1, обеспечивая вертикальное перемещение подъемной каретки с грузонесущим органом.

рабатываемой поверхности регулируется механизмом перемещения платформы. После обработки одной полосы здания самоходная тележка передвигается на следующую полосу.

В случае использования подъемника для обработки поверхности стен, например при защите герметика цементным раствором в процессе ремонта стыков крупнопанельных зданий, выдвижная платформа оборудуется блоком заглаживающих брусков. Благодаря тому, что резинометаллические вкладыши обеспечивают упругую подвеску жесткой рамы, происходит равномерное прилегание брусков к устью стыка даже при неровностях поверхности стен. На платформе устанавливается приемный бункер с цементным раствором, оборудованный шнековым питателем, который обеспечивает равномерно-принудительную подачу раствора в шов при движении подъемника.

Выдвижная платформа имеет достаточный ход для перемещения груза в проем здания и может использоваться в сочетании с механизированным инструментом.

В разработанном устройстве для очистки плоских поверхностей также используется четырехзвенный направляющий механизм (рис. 3), что позволяет создавать прямолинейное возвратно-поступательное движение щетки (рабочий ход) и криволинейную траекторию возвратного движения (холостого хода).

Устройство предназначено для очистки плоских поверхностей от различных наплывов бетона, ржавчины, краски, окалины, а также обработки поверхностей путем заглаживания и железнения.

Устройство рекомендуется для применения на предприятиях по изготовлению железобетонных конструкций при обработке панелей, плит и других железобетонных изделий и позволяет улучшить технологичность производства работ и обеспечить геометрическую точность изделий. Для периодической очистки форм в основном используют машины с абразивными кругами или металлическими щет-

ками. Применяемые устройства требуют дополнительной регулировки и контроля в работе при их настройке в оптимальном режиме.

Для повышения производительности обработки плоских поверхностей за счет создания маневренности и увеличения времени нахождения активной части плоской щетки в контакте с обрабатываемой поверхностью разработано устройство для очистки плоских поверхностей (рис. 4). Разработка защищена а. с. № 1602443 СССР, Кл. А 47 L 11/12 [4].

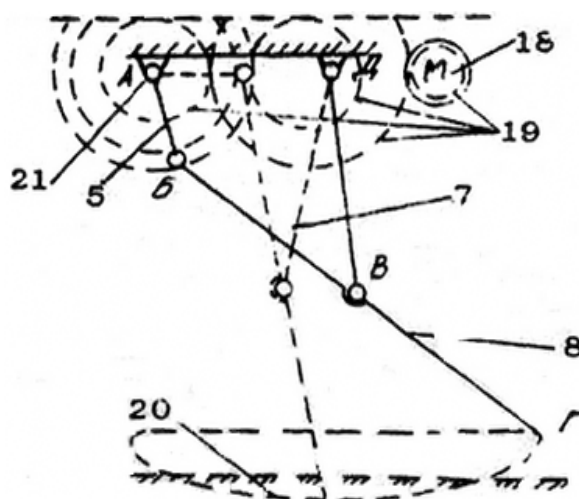


Рисунок 3 — Кинематическая схема направляющего механизма с приводом

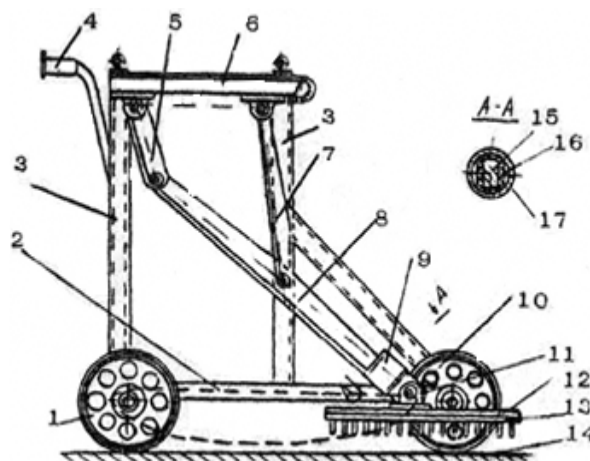


Рисунок 4 — Схема компоновки устройства для очистки плоских поверхностей

Устройство состоит из опорной рамы 2, ведомого рычага 8, качающихся рычагов 5 и 7, которые закреплены на платформе 6. Опорная рама, платформа и соединяющие стойки 3 выполнены из уголков. Качающиеся рычаги совместно с платформой и ведомым рычагом образуют направляющий механизм перемещения щетки. Ведомый рычаг этого механизма через ведущий рычаг 5 и замыкающий средний рычаг 7 подвешен на платформе, а нижняя часть ведомого рычага опирается на плоскую щетку 13. Для перемещения устройства по обрабатываемой поверхности на опорной раме имеются ходовые колеса 1 и рукоятка 4. Упругое примыкание ведомого рычага осуществляется посредством упругой муфты 9. Передача движения от ведомого рычага с лопаткой 15 на остов 12 щетки осуществляется через литую резиновую втулку 16, работающую на сжатие. Упругая муфта с двумя полумуфтами закрыта обоймой 17. Шарнир 11 соединения ведомого рычага с остовом щетки имеет витую пружину 10, которая ограничивает угол поворота щетки. Вращение ведущего рычага осуществляется электрическим приводом, включающим электродвигатель 18, редуктор 19, ведущий вал 21.

Работает устройство следующим образом. После установки щетки на обрабатываемую поверхность, например поддон формы, включается электродвигатель при-

вода, щетка совершает возвратно-поступательное движение по траектории 20, задаваемой четырехзвенным направляющим механизмом. Благодаря этому ворсовые элементы входят в контакт с обрабатываемой поверхностью с последующим увеличением давления за счет упругих свойств материала деталей привода, механизма и щетки.

Устройство, оборудованное вместо щетки пластиной, можно использовать для железнения бетонных поверхностей. При укладке монолитных полов после перерыва в работе вертикальную кромку затвердевшего бетона или раствора можно очистить от цементной пленки, грязи, пыли предложенным устройством со стальными щетками. Увлажнение и грунтовка поверхности могут производиться мягкими щетками. Устройство, закрепленное на подъемнике, можно использовать для очистки от пыли вертикальных швов крупнопанельных зданий при ремонтных работах.

Применение предложенного оборудования позволяет механизировать те работы, которые традиционно выполнялись вручную. Это позволяет повысить качество выполнения работ, что зачастую связано с увеличением межремонтного срока эксплуатации.

В таблице 1 представлена область основного использования разработанного оборудования.

Таблица 1

Область основного применения разработанного оборудования

Наименование законструированного оборудования	Назначение
Устройство для горизонтального перемещения платформы	Приспособление для выполнения работ по герметизации стыков и их ремонту, может использоваться вместо навесных люлек, в комплекте с радиальной щеткой [5] — для расчистки швов, в комплекте с блоком заглаживающих брусьев — для защиты герметика цементным раствором.
Устройство для очистки плоских поверхностей	Механизированная очистка форм на предприятиях производственной базы строительства, очистка от пыли вертикальных швов крупнопанельных зданий при ремонтных работах, железнение бетонных поверхностей.

Выводы:

1. Основанием для разработки новых устройств является использование механизма Чебышева, а именно определенное соотношение линейных размеров звеньев ($AB=1$; $AD=2AB$; $BC=CD=CG=2,5AB$), что позволяет обеспечивать в этих механизмах прямолинейную траекторию движения точек, а следовательно, и рабочего оборудования.

2. Применение разработанных устройств позволяет механизировать те работы, которые традиционно выполнялись вручную.

3. Позволяет повысить качество выполнения работ и производительность труда, увеличить межремонтные сроки эксплуатации, снизить стоимость и сократить сроки производства работ.

Библиографический список

1. Мозговой Г. И., Воронин В. П., Будзило Е. Е. Устройство для горизонтального перемещения платформы // Инф. листок о научно-техническом достижении № 90-003 / Украинский научно-исследовательский институт научно-технической информации и технико-экономических исследований ; Луганский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды. Луганск. 1990. 4 с.
2. Шадрин С. В. Конструкции подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования: метод. указ. расчетно-граф. работы. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. 34 с. : ил.
3. Черкасов А. Н. Грузоподъемные машины : учебное пособие. М. : РГОТУПС, 2001.
4. Мозговой Г. И., Будзило Е. Е., Емец В. С. Устройство для очистки плоских поверхностей : а. с. 1602443 СССР. № 4426962/31-12 ; заявл. 17.05.88 ; опубл. 30.10.1990, Бюл. 40. 3 с.
5. Мозговой Г. И., Емец В. С., Будзило Е. Е. Щетка : а. с. 927224 СССР. № 4186525/31-12 ; заявлено 26.01.87 ; опубл. 30.07.88, Бюл. 28. 3 с.

© Будзило Е. Е., Горовай Н. А.

© Псюк В. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. АДСК ДонГТУ Бондарчуком В. В., к.т.н., доц. каф. инженерной механики и строительства ДонГТУ Балашиовой О. С.

Статья поступила в редакцию 20.06.2023.

PhD in Engineering Budzilo E. E., PhD in Geological and Mineralogical Sciences Gorovaia N. A. (Lugansk State University named after V. Dahl, Lugansk, LPR, the Russian Federation, kilri1ch@i.ua), **Psiuk M. Yu.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation, marikapt@rambler.ru)

DESIGNING NEW EQUIPMENT USING THE CHEBYSHEV MECHANISM

The work aims to improve the level of mechanization of work. Variants of new equipment using the Chebyshev mechanism have been developed to expand their operational capabilities.

Key words: Chebyshev hinge mechanism, power-operated tools, interrepair life.

References

1. Mozgovoï G. I., Voronin V. P., Budzilo E. E. Device for horizontal movement of the platform [Ustrojstvo dlya gorizontalnogo peremeshcheniya platformy]. Inf. sheet of scientific and technical achievement No. 90-003. Ukrainian research institute of scientific and technical information and feasibility studies; Lugansk intersectoral territorial center for scientific and technical information and propaganda. Lugansk, 1990. 4 p. (rus)
2. Shadrin S. V. Designs of handling, construction, road facilities and equipment: method. settlement-graph instructions. Works [Konstrukcii pod'mno-transportnyh, stroitel'nyh, dorozhnyh sredstv i oborudovaniya: metod. ukazaniya raschetno-graf. Raboty.]. Khabarovsk: Publishing House of FESTU, 2015. 34 p. (rus)

3. Cherkassov A. N. Hoisting machines: study letter [Gruzopod''emnye mashiny: uchebnoe posobie]. M.: RSOTUT, 2001. (rus)

4. Mozgovoi G. I., Budzilo E. E., Emets V. S. Flat Surface Cleaner: a. с. 1602443 СССР. No. 4426962/31-12, submitted 17.05.88, published 30.10.90, Bulletin 40. 3 p.

5. Mozgovoi G. I., Emets V. S., Budzilo E. E. Brush: a. с. 927224 СССР. No. 4186525/31-12, submitted 26.01.87, published 30.07.88, Bulletin 28. 3 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Будзило Елена Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент каф. строительства и архитектуры
Луганский государственный университет имени Владимира Даля,
г. Луганск, Луганская Народная Республика, РФ,
e-mail: kilri1ch@i.ua

Горовая Наталья Анатольевна, канд. геол. наук, доцент каф. строительства и архитектуры
Луганский государственный университет имени Владимира Даля,
г. Луганск, Луганская Народная Республика, РФ

Псюк Марина Юрьевна, ст. преп. каф. промышленного строительства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ
e-mail: marikapt@rambler.ru

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**MECHANICAL ENGINEERING
AND MACHINE SCIENCE**

УДК 621.793.7

¹Харламов Ю. А., ¹Вишневский Д. А., ¹Петров П. А., ²Бочаров А. В.¹Донбасский государственный технический университет,²Липецкий государственный технический университет

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПУЛЬСИРУЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫХ УСТРОЙСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Статья посвящена анализу рабочего цикла пульсирующего процесса детонационно-газового напыления и возможных направлений его совершенствования, который позволяет рассчитывать на улучшение технико-экономических показателей и упрощение конструкций оборудования. Длительность продувки детонационно-газовых камер сгорания может быть сокращена за счет более рациональной организации подачи продувочного газа при минимальном перемешивании с остаточными продуктами сгорания, а также выбором оптимальной длины продувочной пробки. Представлен полный цикл работы детонационно-газовых установок для напыления, выраженный в последовательности смены восьми фаз в единичном цикле работы.

Ключевые слова: детонационно-газовые установки, напыление поверхностей, продувочная пробка, пульсирующий процесс газового напыления, искровой источник, окислитель.

Введение. В простейшем случае устройство для детонационно-газового напыления представляет собой трубу, оснащенную системами подачи горючего газа и окислителя (кислорода, воздуха, в том числе обогащенного кислородом и др.), а также системами подачи порошка и инициирования детонации [1–3]. С одного конца труба открыта, с другого — полностью закрыта, частично закрыта или периодически перекрывается с помощью различных клапанов для пульсирующей подачи газов и является основным органом детонационно-газовой установки (ДГУ) — детонационной камерой сгорания (ДКС). Единичный рабочий цикл начинается с частичного или полного заполнения горючей смесью газов (ГС) и порошком напыляемого материала. Затем производится инициирование детонации смеси, в результате чего вдоль ДКС распространяется детонационная волна (ДВ), которая, сжигая ГС, создает высокое избыточное давление и большую скорость продуктов детонации (ПД). Частицы порошка нагреваются и с высокой скоростью выбрасываются на поверхность напыляемого изделия, образуя единичный слой покрытия. После выхода ДВ в атмосферу давление в

ДКС снижается, затем может проводиться продувка ДКС от ПД, либо сразу подается новая порция ГС, и происходит повторение единичного цикла процесса напыления. Обычно частота повторения циклов составляет 4...10 Гц. Такая организация рабочего процесса в пульсирующих детонационно-газовых устройствах для напыления покрытий (ДГУ) усложняет их конструкцию и техническое обслуживание и ограничивает возможности повышения производительности напыления и других технологических операций. Для обеспечения требуемой последовательности и расхода рабочих газов в ДГУ необходимо использовать подвижные детали, что ведет к их износу.

Цель данной статьи заключается в анализе рабочего цикла пульсирующего процесса детонационно-газового напыления и возможных направлениях его совершенствования.

Особенности единичного рабочего цикла процесса детонационно-газового напыления. Рабочий процесс напыления реализуется в детонационной камере сгорания, где организуется регулярное пульсирующее сжигание горючей смеси газов в детонационном режиме. Основными фазами единичного цикла являются следующие:

1. Заполнение рабочей полости ДКС подготовленной горючей смесью газов.

2. Подача в ДКС порции напыляемого порошка, может выполняться во время заполнения ДКС горючей смесью газов.

3. Инициирование горения и обеспечение его перехода в детонацию.

4. Выхлоп из ДКС продуктов горения и детонации со взвешенными частицами порошка.

5. Продувка ДКС от остаточных газов.

На рисунке 1 представлена типичная последовательность смены фаз в единичном цикле работы детонационно-газовой установки для напыления (ДГУ).

В *нулевой фазе* рабочего цикла работы ДГУ рабочая полость ее ДКС заполнена остаточными газами при атмосферном давлении p_0 , состав которых зависит от используемых принципов организации рабочего процесса: с продувкой продувочным газом или без продувки с вытеснением остаточных газов свежей горючей смесью. Обычно традиционные ДГУ работают с удалением остаточных газов продувкой, после которой рабочая полость ДКС заполнена продувочным газом, однако по направлению к открытому концу могут быть подмешаны продукты сгорания и атмосферный воздух. В первоначальный период времени работы ДГУ по напылению конкретных изделий температура остаточных газов будет равна температуре окружающей среды, а затем будет постепенно повышаться до критического значения, зависящего от конструктивных особенностей ДГУ и системы охлаждения.

Первая фаза рабочего цикла заключается в подготовке и заполнении ДКС горючей смесью газов, включающей по крайней мере два компонента — горючий газ и окислитель. В качестве горючих газов используются ацетилен, пропан-бутан, МАФ, метан и др., а также их смеси. В качестве окислителя обычно используется кислород, в отдельных случаях может использоваться воздух, в том числе обогащенный кислородом. Для регулирования параметров про-

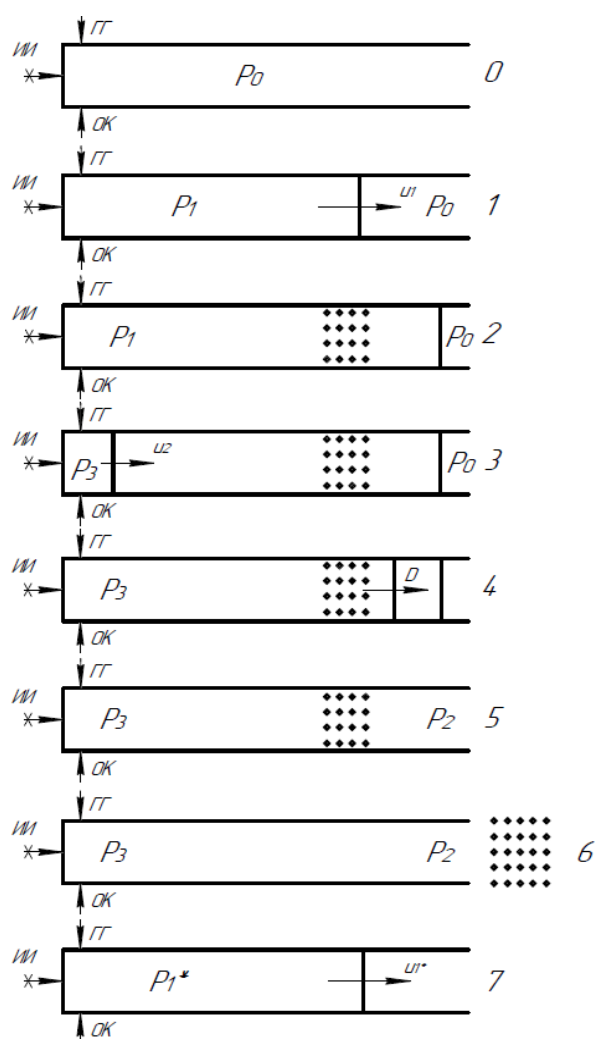
дуктов детонации в горючую смесь могут вводиться инертные газы и азот. Обычно горючая смесь вводится в ДКС у ее закрытого конца, причем могут вводиться отдельными струями горючий газ и окислитель с их последующим перемешиванием в ДКС или уже подготовленная в смесительной камере горючая смесь. В первом случае смешение горючего газа и окислителя требует определенного пути перемешивания, для его достаточности принимаются специальные меры. В процессе наполнения рабочую полость ДКС схематично можно представить условно разделенной на две зоны границей раздела между свежей горючей смесью и остаточными газами, движущейся в направлении открытого конца со скоростью U_1 (рис. 1). Время и расход газовых компонентов горючей смеси определяют степень наполнения ДКС:

$$k = \frac{L_{fg}}{L},$$

где L_{fg} — длина участка ДКС, заполненной свежей горючей смесью (от закрытого конца до границы раздела свежей горючей смеси и остаточных газов); L — длина ДКС.

Для осуществления эффективного рабочего процесса детонационно-газового напыления необходимо выполнение ряда условий, нарушение которых не позволит обеспечить устойчивую регулярную детонацию горючей смеси. Это прежде всего строгое поддержание состава горючей смеси, подаваемой в рабочую полость ДКС, и степени наполнения ДКС. Необходимо исключить преждевременное воспламенение горючей смеси от горячих стенок ДКС и газоподводящих элементов, а также неуправляемого самовоспламенения в контакте и при смешении горючей смеси с остаточными газами.

Время наполнения ДКС свежей горючей смесью $t_{ДКС}$ является наиболее длительной фазой единичного цикла напыления, а сам процесс газообмена — неизученным.



ГГ — горючий газ; ОК — окислитель
 ии — искровой источник; 0 — атмосферные условия в ДКС; 1 — заполнение ДКС горючей смесью; 2 — подача в ДКС порции порошка напыляемого материала; 3 — инициирование горения и переход горения в детонацию (ПГД); 4 — сгорание горючей смеси в детонационном режиме; 5 — полное сгорание горючей смеси, нагрев и ускорение частиц порошка продуктами детонации; 6 — истечение (выхлоп) продуктов сгорания с частицами порошка из ДКС; 7 — продувка ДКС (удаление остаточных продуктов сгорания и других газов)

Рисунок 1 — Цикл работы ДГУ

Вторая фаза единичного цикла работы ДГУ связана с подачей в ДКС порции порошка напыляемого материала. Основным условием для эффективной реализации процесса напыления является обеспечение оптимального размещения достаточно от-

меренной дозы порошка в ДКС перед инициированием горения и детонации. Эта фаза обычно во времени совмещается с наполнением ДКС горючей смесью. Доза порошка вдувается в ДКС струей транспортирующего газа, обычно азота или воздуха. Применяют осевую подачу порошка со стороны закрытого конца и поперечную подачу. Первый вариант осуществляется с помощью специального водоохлаждаемого сопла, введенного в рабочую полость ствола, и преимущественно использовался в первых создаваемых ДГУ. Транспортирующий газ разбавляет горючую смесь и влияет на характер и интенсивность взаимодействия частиц порошка и продуктов детонации. При использовании этого способа порошковое облачко перемещается в направлении открытого конца, при этом трудно обеспечить его оптимальную длину и равномерное распределение по его объему частиц порошка, имеет место осаждение частиц на стенки ДКС. В последнее время ведутся работы по созданию и совершенствованию способов и устройств для поперечной подачи порошка. Однако детальные сведения об исследовании процессов ввода порошка отсутствуют.

Третья фаза связана с инициированием горения горючей смеси в детонационном режиме. Известны два принципиальных подхода к реализации детонационных режимов горения: прямое инициирование детонации и переход от медленного горения к детонации (ПГД). В условиях напыления покрытий используют второй подход ПГД. После достижения требуемой степени наполнения ДКС горючей смесью инициируется горение искровым разрядом (обычно с помощью автомобильной свечи). Использование подобных малоинтенсивных источников инициирования детонации, когда энергия, выделяемая источником, во много раз меньше энергии, выделяемой при детонации топливной смеси, характерно для большинства энергосиловых и технологических установок. Иницирование горения в ДГУ чаще осуществ-

ляется в камерах зажигания, обеспечивающих факельный механизм зажигания в рабочей полости ДКС и, соответственно, более быстрый переход горения к детонации. Механизмы инициирования горения и детонации являются предметом многочисленных исследований в теории горения и детонации. После поджига смеси переход горения в детонацию происходит на значительном расстоянии от закрытого торца трубы, а скорость детонационной волны не сразу достигает значения, соответствующего скорости установившейся детонации Чепмена — Жуге [4, 5].

Преддетонационный период времени от момента зажигания до возникновения детонационной волны $t_{\text{пред}}$ и длина преддетонационного участка $L_{\text{пред}}$ зависят от состава и свойств горючей смеси, конструктивных особенностей и условий в ДКС. Например, для ацетиленокислородной смеси $L_{\text{пред}}$ не превышает размера поперечного сечения ДКС, а для пропановоздушной смеси чрезмерно велика. Известно много и разрабатываются новые средства и пути уменьшения преддетонационного участка для ПГД [6].

Четвертая фаза включает в себя сгорание горючей смеси в детонационном режиме. Скорость детонационного горения на два порядка превышает скорость нормального горения. Частота циклов детонационного сгорания варьируется путем независимого инициирования детонации, контролируемой системой зажигания, согласованной с работой систем подачи в ДКС газов и порошка. Скорость фронта детонационной волны D в газах составляет 1,5...3 км/с, скорость продуктов химической реакции u в 2...4 раза меньше, а давление определяется из равенства

$$PD = p \cdot u \cdot D.$$

Значение температуры находится в пределах 2000–5000 К. Для перехода от дефлаграции к детонации, а также передаче детонации для данной горючей смеси

необходимо выдерживать определенные геометрические соотношения по длине, диаметру трубы, зависящие от размера ячейки детонационного фронта смеси [7]. При прохождении ДВ через порошковое облачко начинается взаимодействие частиц порошка с продуктами детонации и изменение параметров детонации.

Пятая фаза относится к полному сгоранию горючей смеси с выходом детонационной волны на срез ДКС или границу раздела с остаточным газом, нагреву и ускорению частиц порошка продуктами детонации в рабочей полости ДКС. После прохождения ДВ через порошковое облачко начинается взаимодействие между потоком продуктов детонации (газовой фазой) и частицами порошка (твердой фазой), которые нагреваются и ускоряются в направлении открытого конца ствола. По мере перемещения порошкового облака происходит интенсивный энергообмен между фазами в сближение значений температуры и скорости фаз. Интенсивность этого сближения зависит от теплофизических свойств и параметров ПД и материала частиц порошка, а также в значительной мере от формы и размеров части порошка. Имеет место химическое взаимодействие между твердой и газовой фазами.

Шестая фаза начинается после достижения ДВ открытого конца ДКС, когда в продуктах детонации по направлению закрытого конца распространяется волна разрежения и начинается истечение (выхлоп) продуктов детонации с частицами порошка. Из ДКС истекает импульсная напылительная струя [8] и на определенном расстоянии от среза (дистанции напыления) соударяется с напыляемой поверхностью, образуя единичное пятно покрытия. Вопросы формирования детонационно-газовых напылительных струй и образования покрытий являются предметом большинства исследований.

Седьмая (заключительная) фаза рабочего цикла ДГУ относится к продувке ДКС для удаления остаточных продуктов сгора-

ния горючей смеси. Продувка выполняется для подготовки ДКС к последующему рабочему циклу, обеспечивая минимальное подмешивание продуктов детонации в свежую порцию горючей смеси и исключая ее прямой контакт с горячими продуктами детонации во избежание преждевременного воспламенения. Чем выше скорострельность (частота повторения единичных циклов напыления), тем более горячие продукты детонации вытесняются из ДКС. Обычно для продувки используют относительно дешевый азот, иногда даже воздух. При прочих равных условиях режим движения газа определяет скорость его потока: ламинарный — при низких скоростях, турбулентный — при высоких. Поэтому скорость вытеснения остаточных продуктов сгорания должна быть выше некоторой граничной величины, соответствующей переходу от турбулентного к ламинарному режиму, поскольку при турбулентном течении контактирующие газы смешиваются в меньших объемах [9].

Продувка ствола инертными газами позволяет обеспечить полное вытеснение остаточных газов, содержащих продукты сгорания и частицы порошка, дополнительное охлаждение стенок ствола, а при достаточном расходе и длительности подачи — и охлаждение напыляемого изделия, исключает перемешивание свежей горючей смеси с продуктами сгорания. Подбором состава продувочного газа можно в какой-то мере управлять характером перемешивания свежей горючей смеси с вытесняемым газом. Надлежащим построением циклограммы рабочего цикла процесса достигается защита с помощью продувочного газа от обратного удара пламени. Недостатками этого приема являются увеличенный расход газов и усложнение конструкции ДГУ.

Длительность единичного цикла детонационно-газового напыления t определяется временем $t_{згс}$ заполнения ДКС горючей смесью, временем на подачу порошка, преддетонационным периодом,

временем t_p детонационного сгорания, временем истечения импульсного напылительного потока и временем продувки:

$$t = t_{згс} + t_{пор} + t_{пред} + t_d + t_{и} + t_{пр}.$$

Скорострельность ДГУ (частота пульсаций)

$$v = \frac{1}{t}.$$

Скорострельность можно увеличить за счет уменьшения длительности отдельных фаз рабочего цикла и, прежде всего, заполнения ДКС свежей горючей смесью и продувки. Подачу порошка следует совмещать с наполнением ДКС горючей смесью. Относительные доли времени рабочего цикла на преддетонационный период, детонационное сгорание и истечение продуктов сгорания незначительны и для определенных ДКС и условий напыления не контролируются.

Минимально возможное время заполнения ДКС постоянного сечения свежей горючей смесью можно оценить введением коэффициента k в выражение работы [10]:

$$t_{згс} = \frac{kL}{a_{кр1}}.$$

где k — степень заполнения ДКС по длине (относительная доля длины ДКС, заполняемая свежей горючей смесью), при полном заполнении $k=1$; L — длина ДКС; $a_{кр1}$ — критическая скорость звука горючей смеси.

Время подачи порошка учитывается при осуществлении её после наполнения ДКС горючей смесью и определяется экспериментально или задается циклограммой ДГУ.

Преддетонационный период определяется экспериментально для используемой горючей смеси, конструктивных особенностей ДГУ и условий в ДКС.

Время инициирования детонации, полагаемая равномерное ускорение фронта пламени от момента искрового разряда до возникновения детонации:

$$t_{пред} = \frac{2L_{пред}}{D},$$

где $L_{\text{пред}}$ — длина преддетонационного участка.

Время детонационного сгорания:

$$t_{\text{д}} = \frac{(kL - L_{\text{пред}})}{D} = \frac{kL}{D} - \frac{L_{\text{пред}}}{D}.$$

Время истечения продуктов сгорания:

$$t_{\text{и}} \approx \frac{L}{a_{\text{кр2}}},$$

где $a_{\text{кр2}}$ — скорость звука продуктов сгорания.

Минимально возможное время продувки ДКС постоянного сечения по всей длине:

$$t_{\text{пр}} \approx \frac{L}{a_{\text{кр3}}},$$

где $a_{\text{кр3}}$ — скорость звука продувочного газа.

Тогда сумма относительных долей времени единичного цикла, необходимых для выполнения отдельных его элементов (фаз), может быть представлена как

$$1 = \frac{t_{\text{згс}}}{t} + \frac{t_{\text{пор}}}{t} + \frac{t_{\text{пред}}}{t} + \frac{t_{\text{д}}}{t} + \frac{t_{\text{и}}}{t} + \frac{t_{\text{пр}}}{t}.$$

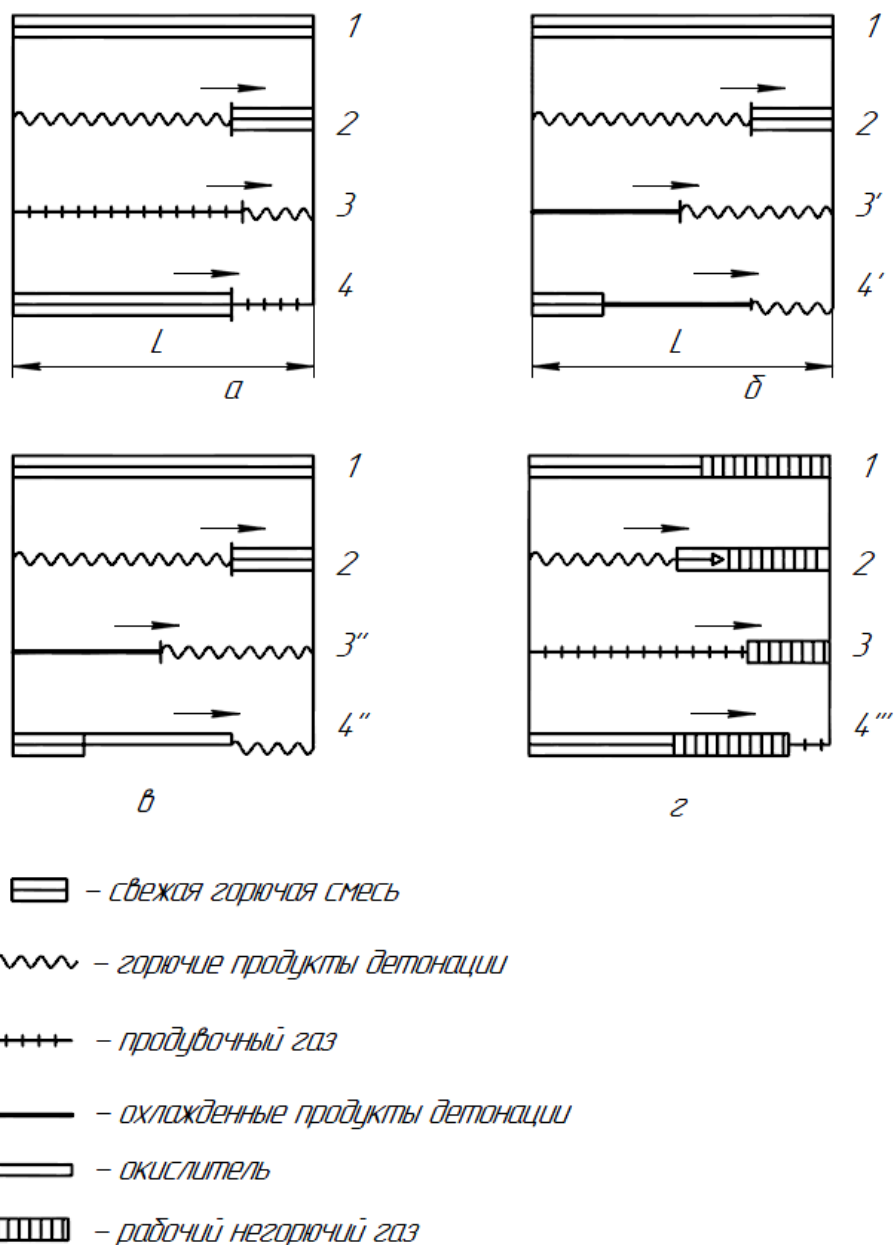
Длительность единичного цикла можно представить также как

$$t = \frac{L \left(\frac{k}{a_{\text{кр1}}} + \frac{k}{D} + \frac{1}{a_{\text{кр2}}} + \frac{1}{a_{\text{кр3}}} \right) + t_{\text{пор}} + L_{\text{пред}}}{D}.$$

Способы организации рабочего процесса в детонационно-газовых устройствах технологического назначения. Кроме напыления покрытий газовая детонация применяется и при других видах обработки, связанных с вводом в ДКС различных материалов: струйно-абразивной обработке, сфероидизации порошков, получении специальных материалов и др. Многие из подобных установок работают с выполнением отдельных фаз рабочего процесса в последовательности, показанной на рисунке 1. Состояние газовой среды в ДКС

по её длине для этого способа организации рабочего процесса показана на рисунке 2, а. ДГУ, работающие с такой формой организации, используют механические или электромеханические клапаны для циклической подачи газов в ДКС. Однако всё возрастающие требования к повышению надежности и упрощению конструкций ДГУ привели к разработке других методов организации рабочего процесса.

Продувка охлажденными продуктами сгорания. Подача свежей горючей смеси с непосредственным выталкиванием ею продуктов сгорания реализуется или при непрерывном вводе её в камеру сгорания, или при пульсирующей её подаче. В первом случае условия ввода горючей смеси должны быть согласованы с условиями проскока пламени. Теория проскока пламени дана в работах [11, 12]. Для бедных ацетиленокислородных смесей при использовании горючих газов-заменителей ацетилена и топливно-воздушных смесей могут применяться, как правило, обычные инжекционные смесители, используемые при газопламенной обработке. Вопросы непрерывного ввода горючей смеси в ствол рассмотрены также в работах [3, 13, 14]. На основе анализа процессов, сопутствующих детонации газов в трубах, предложено вводить газовую смесь в ствол ДГУ через сопло с использованием принципа инжекторного смешения горючего газа и кислорода (по а. с. СССР № 508994 и патенту на полезную модель РФ № 147755). При размерах сопла, обеспечивающих истечение смеси в режиме отрыва пламени, и расположении его перпендикулярно к оси ствола проникновение детонации в зону инжекции (обратный удар) отсутствует. Благодаря использованию в качестве несущего газа кислорода с подсосом ацетилена низкого давления обеспечивается локализация горения в зоне инжектора в случае аварийного прорыва пламени через сопло и устранение аварийной ситуации путем срыва инжекции за счет подачи азота в зону инжекции (объем вводимого газа не превышает 5 % объема ствола).



1 — наполнение ДКС горячей смесью и негорючими рабочими газами по всей длине;
 2 — стадия незакончившегося выгорания горячей смеси; 3 — вытеснение остаточных продуктов сгорания продувочным газом; 3' — вытеснение остаточных продуктов сгорания охлажденными продуктами сгорания; 3'' — вытеснение остаточных продуктов сгорания газом-окислителем; 4 — стадия наполнения ДКС горячей смесью с выталкиванием продувочного газа; 4' — стадия наполнения ДКС горячей смесью с выталкиванием горячих продуктов сгорания через пробку охлажденных продуктов детонации; 4'' — стадия наполнения ДКС горячей смесью с выталкиванием горячих продуктов сгорания через пробку окислителя; 4''' — стадия наполнения ДКС горячей смесью с выталкиванием негорючих рабочих газов

Рисунок 2 — Состояния газовой среды в детонационно-газовых камерах сгорания для напыления покрытий при различных способах организации рабочего процесса в ДГУ:

- а — с полной продувкой ДКС; б — продувка охлажденными продуктами сгорания;
 в — продувка газом — компонентом горячей смеси;
 г — неполное заполнение ДКС горячей смесью

Во втором случае используют клапанные или иные системы, обеспечивающие прерывание подачи свежей смеси во время её выгорания и охлаждения продуктов сгорания.

В последние годы разрабатываются бесклапанные ДГУ, позволяющие повысить скорострельность. Одна из таких установок, использующих газодинамические клапаны, предложена в а. с. РФ № 147755. Подача газов осуществляется бесклапанным методом, запираание магистралей подачи происходит за счет эффекта газодинамических клапанов, которые устраняют проблему износа трущихся деталей. Преждевременное воспламенение предотвращается охлаждением продуктов сгорания в достаточно тонких и длинных трубках, через которые подаются компоненты горючей смеси. Газодинамические клапаны предотвращают неконтролируемое воспламенение свежих порций горючей смеси горячими продуктами сгорания предыдущего цикла. Это достигается путем охлаждения продуктов сгорания в магистралах подачи до температуры, при которой период индукции воспламенения новой порции горючей смеси превышает время контакта с охлажденными продуктами сгорания. Состояние газовой среды в ДКС по её длине для этого способа организации рабочего процесса показано на рисунке 2, б.

Цикл работы ДКС начинается с ее заполнения смесью горючего газа и окислителя. После воспламенения смеси электрической свечой в процессе горения происходит переход в детонацию, которая распространяется к открытому концу ДКС. Давление в камере сгорания поднимается выше давления внутри магистралей подачи горючего газа и окислителя. Продукты сгорания проникают в магистрали подачи и прерывают подачу горючего газа и окислителя (газодинамические клапаны закрыты). После достижения детонационной волной открытого конца волна разрежения распространяется в продуктах детонации. В определенный момент эта волна разрежения достигнет границы контакта между

продуктами сгорания и компонентами горючей смеси внутри соответствующих магистралей и завершит расширение продуктов сгорания в эти магистрали (газодинамические клапаны открыты). После этого все газы распространяются в сторону открытого конца ДКС. Неконтролируемые воспламенения горючей смеси блокируются продуктами сгорания, охлажденными в магистралах подачи газов. После этого ДКС заполняется горючей смесью снова, и цикл повторяется.

Продувка газом — компонентом горючей смеси. Недостатками описанных выше способов организации рабочего процесса являются увеличенный расход газов и усложнение конструкций ДГУ. Упрощение конструкции достигается при использовании для продувки одного или нескольких газов-компонентов горючей смеси. Одна из первых схем такого назначения показана на рисунке 3 (по а. с. СССР № 629682). В ДГУ использован инжекционный смеситель, смонтированный у закрытого торца ствола 1, имеющий смесительную камеру 2, камеру горючего газа 3, подвижной инжектор 4 с подводом газ-окислителя, связанный с приводом возвратно-поступательного движения 5. При левом положении инжектора истекающая из него струя окислителя (воздуха, кислорода и пр.) эжектирует горючий газ, и они, перемешиваясь в камере 2, поступают в рабочую полость ствола 1. Образующаяся горючая смесь вытесняет остаточные газы и заполняет ствол. Затем привод 5 перемещает инжектор в правое положение, перекрывая проход между камерами 2 и 3. Окислитель, продолжая непрерывно истекать из инжектора, формирует защитную газовую пробку перед воспламенителем 6. Последний инициирует горение. После выгорания горючей смеси поток окислителя вытесняет из ствола продукты сгорания. После перемещения инжектора в левое положение процесс повторяется. Для надежной работы этой схемы ДГУ необходимо обеспечить тщательное сопряжение и гер-

метизацию сочленения инжектора со смесительной камерой. Рассмотренная схема газообмена может быть реализована и с помощью обычных ДУ, имеющих систему механических клапанов, за счет соответствующей организации рабочего цикла процесса ДГН.

Рабочий процесс при частичном заполнении ДКС горючей смесью. Недостатком традиционного напыления покрытий с полным заполнением ДКС горючей смесью являются ограниченные технологические возможности. Частицы порошка при разгоне непосредственно потоком высокотемпературных и высокоскоростных продуктов детонации подвергаются сильному нагреву, а также могут реагировать с окружающими газами. Для ряда напыляемых материалов это может привести к нежелательному изменению их химического состава, микроструктуры и свойств, а для некоторых — к их разложению (например, полимеры). По предложенному в патенте РФ № 2329104 способу ДКС наполняют свежей горючей смесью на части ее длины со стороны закрытого конца, а часть ДКС со стороны открытого конца — негорючим рабочим газом. Порошок подается в зону негорючего рабочего газа, и частицы разгоняют проходящей по негорючему рабочему газу ударной волной. По сути, детонационно-газовый способ нанесения покрытий становится ударно-волновым, в котором разгон частиц порошка производят ударной волной, возбуждаемой в негорючем рабочем газе расширяющимися продуктами детонации детонирующей газовой смеси.

Библиографический список

1. Шоршоров М. Х. *Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий*. М. : Наука, 1978. 224 с.
2. Зверев А. И. *Детонационное напыление покрытий*. Л. : Судостроение, 1979. 232 с.
3. Бартенев С. С. *Детонационные покрытия в машиностроении*. Л. : Машиностроение, 1982. 215 с.
4. *Импульсные детонационные двигатели / под ред. С.М. Фролова*. М. : Торус Пресс, 2006. 592 с.
5. Ro G. D. *Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective // Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. Vol. 30. No. 6. Pp. 545–672.

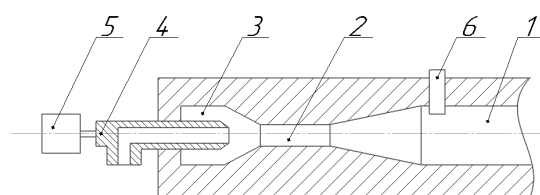


Рисунок 3 — Схема ДГУ с подвижным инжектором

Заключение:

1. Совершенствование и поиск новых способов организации рабочих процессов в пульсирующих детонационно-газовых устройствах для напыления покрытий и других операций позволяет рассчитывать на улучшение технико-экономических показателей и упрощение конструкций оборудования.

2. Для дальнейшего совершенствования детонационно-газовых установок следует провести детальные исследования подготовительных фаз рабочего цикла (смешивания и наполнения рабочих газов, ввода обрабатываемых материалов и инициирования детонации), направленных на повышение надежности, уменьшение расхода материалов.

3. Длительность продувки детонационно-газовых камер сгорания может быть сокращена за счет более рациональной организации продувочного газа при минимальном перемешивании с остаточными продуктами сгорания, а также выбором оптимальной длины продувочной пробки.

4. Следует проанализировать возможности использования различных режимов детонационного горения и применения более дешевых и доступных газов.

6. Харламов Ю. А. Управляемое инициирование газовой детонации // Вісник Східноукр. нац. університету імені В. Даля. 2017. № 7 (237). С. 101–113.
7. Николаев Ю. А. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях (обзор) // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 4. С. 22–54.
8. Харламов Ю. А. Детонационно-газовые напылительные струи : монография. Луганск : изд-во Восточно-укр. нац. ун-та им. В. Даля, 2011. 260 с.
9. Ширяпов Д. И. Применение азота при выполнении предпусковых операций на магистральных газопроводах // Газовая промышленность. 2020. № 2. С. 23–30.
10. Анакин А. Т. Оценка параметров пульсирующего детонационного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 3 (41). С. 9–15.
11. Щелоков Я. М. Пособие по освоению систем релаксационного вибрационного горения. Казань : Изд-во КГУ, 1971. 80 с.
12. Моин Ф. В. Явление заброса пламени при горении предварительно перемешанных газов в проточной системе // ФГВ. 1968. № 2. С. 209–214.
13. Федько Ю. П. Исследование процесса нанесения и свойств окисных детонационных покрытий : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1980. 19 с.
14. Федько Ю. П. Физические основы конструирования бесклапанных дозаторов детонирующей смеси газов // Детонационные покрытия. Калинин, 1980. С. 54–63.

© Харламов Ю. А., Вишнеvский Д. А., Петров П. А.

© Бочаров А. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ им. Седуша В. Я.
ДонНТУ Еронько С. П.,
к.т.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М.*

Статья поступила в редакцию 22.05.2023.

Doctor of Technical Sciences Kharlamov Yu. A., Doctor of Technical Sciences Vishnevskiy D. A., PhD in Engineering Petrov P. A. (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation), PhD in Engineering Bocharov A. V. (Lipetsk State Technical University, Lipetsk, the Russian Federation)

ORGANIZATION OF THE WORKFLOW OF PULSATING DETONATION-GAS DEVICES FOR TECHNOLOGICAL PURPOSES

The article is devoted to the analysis of the working cycle of pulsating process of detonation-gas spraying and possible directions for their improvement, which allows us to reckon on the improvement of technical and economic indicators and simplification of equipment designs. The duration of blowing of detonation-gas combustion chambers can be reduced due to a more rational organization of purge gas supply with minimal mixing with residual combustion products, as well as the choice of the optimal length of the purge plug. The full cycle of operation of detonation-gas spraying units is given, expressed in a sequence of eight phases in a single cycle of operation.

Key words: *detonation-gas installations, surface spraying, purging plug, pulsating gas spraying process, spark source, oxidizer.*

References

1. Shorshorov M. Kh. Physical and chemical bases of detonation gas spraying coatings [Fiziko-khimicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napyleniya pokrytij]. M.: Science, 1978. 224 p. (rus)
2. Zverev A. I. Detonation spraying of coatings [Detonatsionnoe napylenie pokrytij]. L.: Shipbuilding, 1979. 232 p. (rus)
3. Bartenev S. S. Detonation coatings in mechanical engineering [Detonacionnyye pokrytiya v mashinostroyenii]. L.: Mechanical Engineering, 1982. 215 p. (rus)

4. Pulse detonation engines eds. S. M. Frolova [Impul'snyye detonacionnyye dvigateli pod red. S. M. Frolova]. M.: Torus Press, 2006. 592 p. (rus)
5. Ro G. D. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. Vol. 30. No. 6. Pp. 545–672.
6. Kharlamov Yu. A. Controlled initiation of gas detonation [Upravlyаемое iniciirovanie gazovoj detonacii]. *Bulletin of East-Ukrainian National University*. 2017. No. 7 (237). Pp. 101–113. (rus)
7. Nickolaiev Yu. A. Gas detonation and its applications in technology (overview) [Gazovaya detonaciya i ee primenenie v tekhnike i tekhnologiyah (obzor)]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2003. Vol. 39. No. 4. Pp. 22–54. (rus)
8. Kharlamov Yu. A. Detonation-gaz spray jets: monograph [Detonacionno-gazovye napylitel'nye strui: monografiya]. Lugansk: Publishing House of East-Ukrainian National University named after V. Dahl, 2011. 260 p. (rus)
9. Shiriapov D. I. Application of nitrogen in pre-launch operations on main gas pipelines [Detonacionno-gazovye napylitel'nye strui: monografiya]. *Gas Industry Journal*. 2020. No. 2. Pp. 23–30. (rus)
10. Anakin A. T. Evaluation of the pulse detonation engine [Ocenka parametrov pul'siruyushchego detonacionnogo dvigatelya]. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2013. No. 3 (41). Pp. 9–15. (rus)
11. Shchelokov Ya. M. Manual for the development of relaxation vibration combustion systems [Posobie po osvoeniyu sistem relaksacionnogo vibracionnogo gorenija]. Kazan: Publishing House of KSU, 1971. 80 p. (rus)
12. Moin F. V. The phenomenon of flame throttle during the combustion of pre-mixed gases in the flow system [Yavlenie zabrosa plameni pri gorenii predvaritel'no peremeshannyh gazov v protochnoj sisteme]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 1968. No. 2. Pp. 209–214. (rus)
13. Fed'ko Yu. P. Study of the process of application and properties of oxidative detonation coatings: synopsis of a thesis of PhD in Engineering [Issledovanie processa naneseniya i svojstv okisnyh detonacionnyh pokrytij: autof. dissert. kand. tekhn. nauk]. 1980. 19 p. (rus)
14. Fed'ko Yu. P. Physical basis of design of valve-free blasting gas dispensers [Fizicheskie osnovy konstruirovaniya besklapannyh dozatorov detoniruyushchej smesi gazov]. *Detonacionnye pokrytiya*. Kalinin, 1980. Pp. 54–63. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Вишневский Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Бочаров Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент каф. металлургического оборудования Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, РФ

УДК 669.187.24:669.162.2/4:621.791.14

¹Сотников А. Л., ¹Пасечник С. Ю., ²Вишневский Д. А., ²Орлов А. А.,
³Каленская А. В., ³Муховатый А. А.

¹Донецкий национальный технический университет,

²Донбасский государственный технический университет,

³Луганский государственный университет имени Владимира Даля

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ВОЗДУШНЫХ ФУРМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Выполнен анализ способов сварки трением с перемешиванием с позиции решения технологических проблем сварки воздушных фурм доменных печей. Решение проблем заключается в изменении конструкции сварных соединений воздушной фурмы таким образом, чтобы стало возможным применить сварку трением с перемешиванием, используя сварочный инструмент с изменяемой геометрией и специализированную сварочную машину или роботизированную сварочную головку.

Ключевые слова: воздушная фурма, сварка трением с перемешиванием, сварочный инструмент, тип сварного соединения, сварочная машина, сварочная головка.

Введение. Развитие сварки трением с перемешиванием (СТП) за последние несколько десятилетий привело к появлению множества разновидностей процесса сварки, а также к выявлению проблем, характерных только для данного способа сварки. СТП нашла применение как для получения линейных (стыковых и кольцевых) и точечных сварных соединений, так и для нанесения тонких покрытий на толстую подложку.

Значительным преимуществом внедрения СТП является то, что получаемые сварные соединения сразу же после завершения процесса сварки готовы к дальнейшему использованию. Затраты на зачистку шлака, шлифование, полирование, выравнивание практически исключены. Основная проблема на этапе внедрения СТП в производство металлоконструкций заключается в том, что конструкции, разработанные под сварку плавлением, не всегда подходят для применения СТП. Ограничивающим фактором являются относительно высокие силы прижатия свариваемых деталей и наличие подкладки или второго инструмента с обратной стороны [1]. Для простых случаев конструкции сварных соединений достаточно спроектировать специальное прижимное устройство, в противном случае

требуется изменение конструкции самого сварного соединения.

В качестве примера рассмотрим применение СТП для изготовления сварной конструкции воздушных фурм доменных печей [2].

Способы СТП и особенности получаемых сварных соединений. Технологические возможности СТП позволяют выполнять различные типы сварных соединений (рис. 1) [3]:

– стыковое соединение — самое распространенное, т. к. не требует специальных форм инструмента, а также не требует подготовки кромок (рис. 1, а);

– нахлесточно-стыковое соединение представляет собой тоже стыковое соединение, только в качестве одной из соединяемых деталей выступает биметаллическая пластина (рис. 1, б);

– нахлесточное соединение чаще всего используется, когда необходимо соединить детали разной толщины, т. к. это соединение позволяет сварить практически любые толщины между собой, но необходима определенная подготовка кромок под сварку (рис. 1, в);

– пакетная сварка (многослойное нахлесточное) технически выполняется так же,

как и стыковая, но здесь более строгие требования к выбору сварочного инструмента, т. к. необходимо проварить все имеющиеся слои материала для удовлетворительного качества сварного соединения (рис. 1, *з*);

– двухпроходное тавровое соединение (рис. 1, *д*) и тавровое соединение одним швом на прорез (рис. 1, *е*) — очень сложные соединения по технологии, т. к. необходимо очень точно позиционировать сварочный инструмент в месте сварки;

– угловое соединение с внешней стороны выполняется так же, как и стыковое соединение (рис. 1, *ж*);

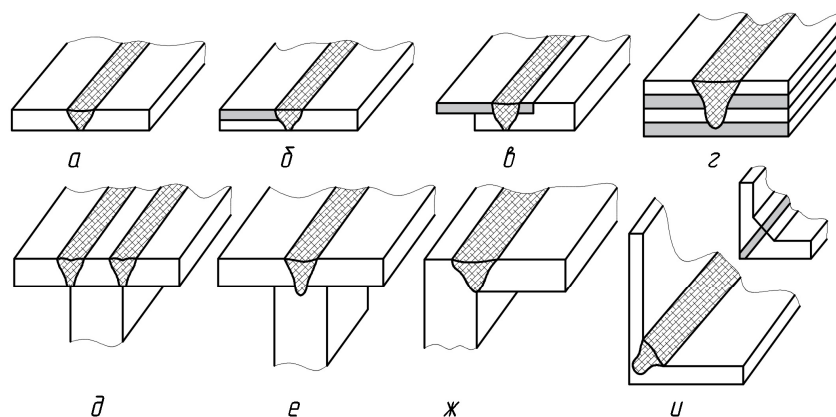
– угловое соединение с внутренней стороны требует определенной подготовки свариваемого стыка, т. к. без данной подготовки выполнение такого соединения не представляется возможным (рис. 1, *и*).

В традиционном варианте установка сварочного инструмента при СТП осуществляется под углом к сварному шву (в поперечной плоскости — под прямым углом, в продольной плоскости — под углом $88-89^\circ$), а линейное перемещение инструмента, с одновременным вращением, происходит вдоль шва (рис. 2). При этом траектория движения может быть прямо- и криволинейная. Эти обстоятельства также накладывают ограничения на конструкцию как

сварного соединения, так и прижимного устройства, которые не должны ограничивать свободное перемещение инструмента.

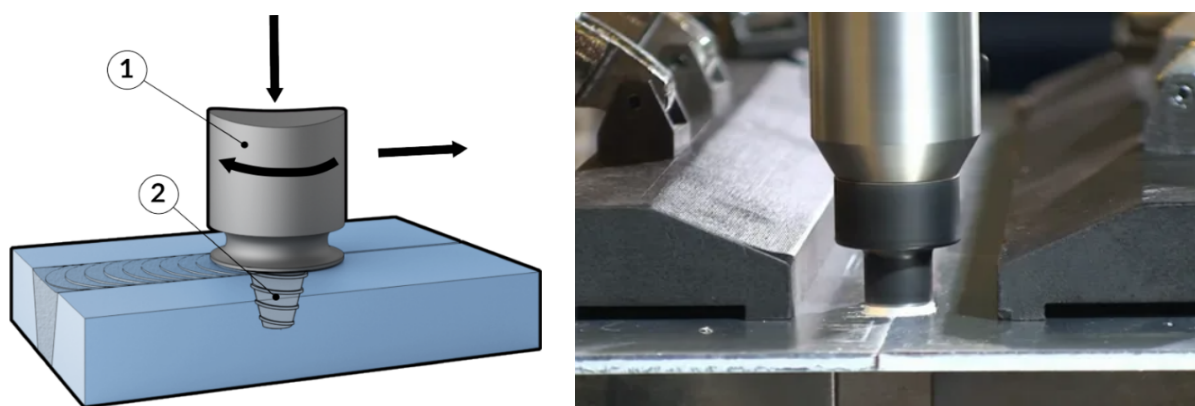
При реализации процесса СТП следует принимать во внимание следующие существенные технологические недостатки процесса сварки. Во-первых, в конце сварного шва остается несквозное отверстие, повторяющее форму наконечника, а во-вторых, в начале шва может быть непровар кромок, поскольку инструмент внедряется в холодный непластифицированный металл [1, 3]. Как правило, для обеспечения качества СТП в начале и конце шва рекомендуется, соответственно, начинать и заканчивать процесс сварки на вводных и выводных (технологических) планках.

Еще одной проблемой СТП является большая вероятность образования дефекта типа «непровар» в корне шва, т. к. длина наконечника инструмента несколько меньше толщины свариваемых деталей, а толщина свариваемых кромок может изменяться по длине стыка [1, 4]. Эту проблему решают, используя подкладку с канавкой, расположенной вдоль стыка заготовок. Во время сварки корень шва выдавливается в формирующую подкладку. После сварки усиление шва (в корневой части) может быть удалено.



а — стыковое; б — нахлесточно-стыковое; в — нахлесточное; г — многослойное нахлесточное; д — двухпроходное тавровое; е — тавровое прорезное; ж, и — угловое

Рисунок 1 — Типы сварных соединений, выполняемых СТП



1 и 2 — хвостовик и наконечник инструмента соответственно

Рисунок 2 — Схема (слева) и внешний вид (справа) линейной СТП двух заготовок

Проблема формирования бездефектного корня сварного шва решается также технологией Bobin Stir Welding [5]. Схема соответствующего процесса сварки приведена на рисунке 3, а. Технология предполагает использование сварочного инструмента, состоящего из верхнего и нижнего заплечиков, вращающихся и перемещающихся как одно целое. Нижний заплечик в данном случае выполняет функцию подкладки.

При СТП больших толщин основной проблемой является необходимость в жестком закреплении заготовок из-за дей-

ствия на них высокого крутящего момента. Решение этой проблемы было найдено путем разработки технологии двухсторонней синхронной сварки, которая также решает проблему формирования дефектного корня шва [6]. На рисунке 3, б представлена схема данного процесса. В этом случае процесс ведется без подкладки, а разное направление вращения инструментов с обеих сторон сварного соединения существенно снижает крутящий момент, а также способствует более равномерному его нагреву по толщине.

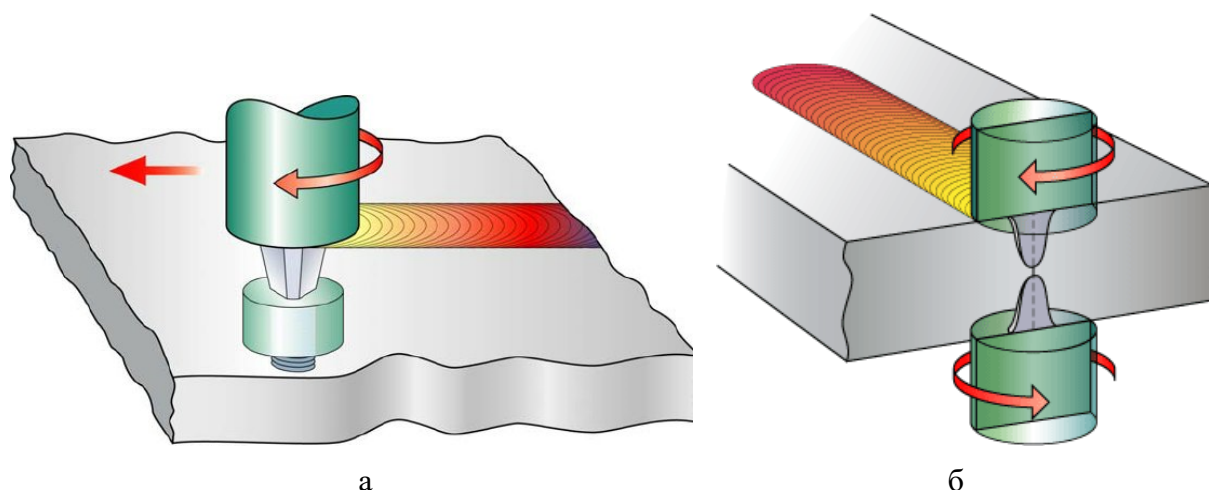


Рисунок 3 — Схема СТП по технологии Bobin Stir Welding (а) [5] и двухсторонней синхронной сварки с разнонаправленным вращением инструментов (б) [6]

Использование двух инструментов привело к появлению технологии Twin-Stir™ [6]. При последовательном движении инструментов друг за другом первый предварительно подогревает металл, а второй осуществляет сварку, согласно схеме на рисунке 4, а. Вращающиеся в противоположные стороны инструменты уменьшают влияние крутящего момента на заготовку; повышается качество шва, улучшается разрушение оксидных пленок без потери механических свойств шва. При параллельном движении значительно увеличивается ширина сварного шва, что применяется при сварке нахлесточных соединений (рис. 4, б): вдоль образуемого шва перемещаются два инструмента, вращающиеся в разные стороны. Расстояние между инструментами должно быть выбрано таким, чтобы зоны перемешивания перекрывались. Применение дополнительного подогрева позволяет увеличить скорость сварки и снизить частоту вращения инструмента. Некоторое смещение по направлению движения двух инструментов, как показано на рисунке 4, в, позволяет использовать преимущества последователь-

ного и параллельного движения сварочных инструментов. Данная технология предъявляет требования по применению многшпиндельных сварочных машин (головок).

Помимо сварки прямолинейных швов, способом СТП возможна сварка кольцевых швов. Основная проблема при сварке кольцевых швов — это завершение процесса сварки таким образом, чтобы исключить образование выходного отверстия от наконечника.

Концерн ESAB предложил оригинальное техническое решение при изготовлении кольцевых швов медных контейнеров для хранения радиоактивных веществ [7], где начало и конец шва при сварке выводятся из зоны стыка (рис. 5), решив тем самым проблему остающегося отверстия в основном металле, которое можно затем заварить другими способами сварки. Также решается проблема непровара кромок в начале шва путем повторного переваривания начального участка шва перед выводом инструмента из зоны стыка.

Применение сварочного инструмента с изменяющейся геометрией значительно упростило сварку кольцевых швов [8].

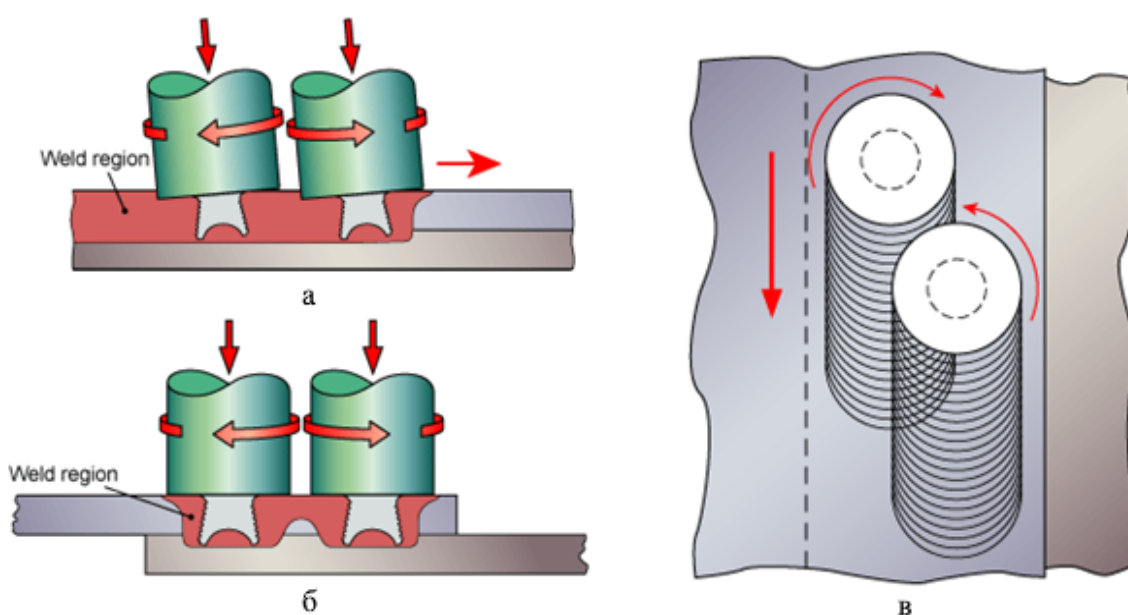


Рисунок 4 — Схема СТП по технологии Twin-Stir™ [6] с последовательным (а), параллельным (б) и смещенным (в) движением сварочных инструментов [6]

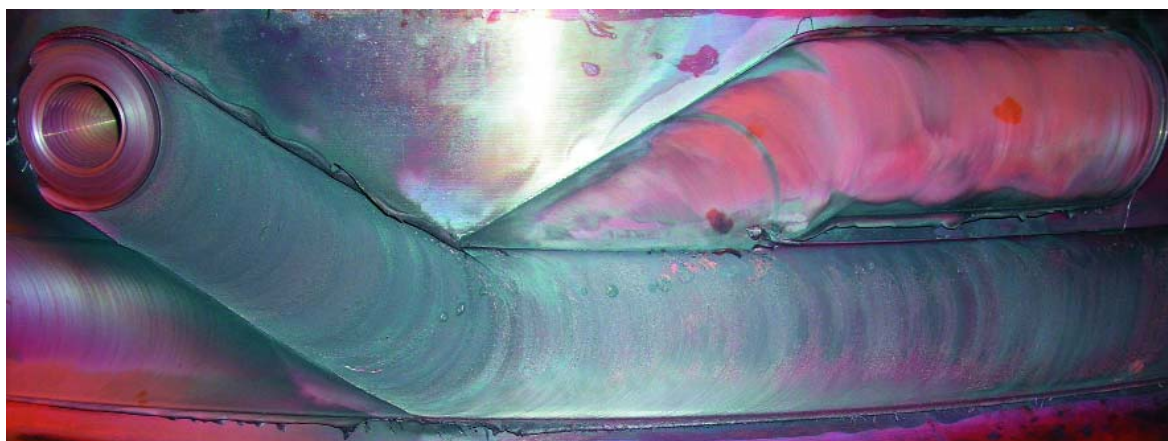


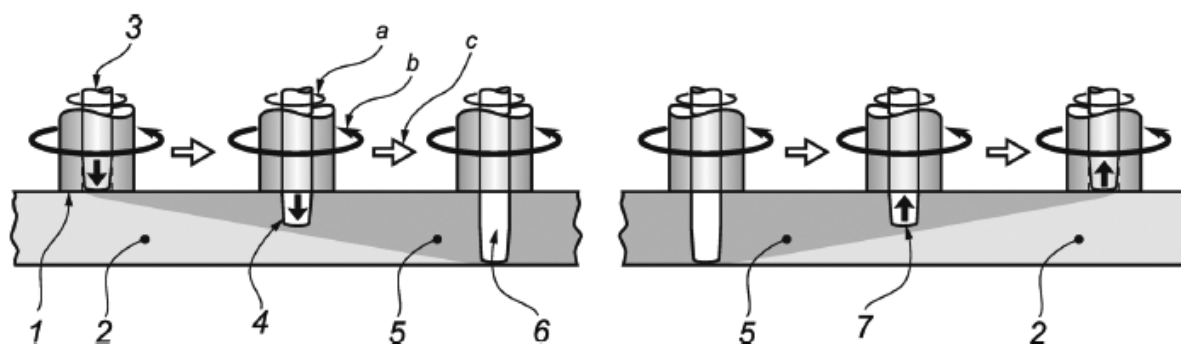
Рисунок 5 — Схема начала и завершения сварки кольцевого шва с образованием выходного отверстия над линией стыка в основном металле [7]

Разработка технологии сварки с раздельным движением наконечника и заплечика дает также возможность снизить скорость вращения заплечика при повышенной скорости вращения наконечника, способствуя тем самым уменьшению тепловыделения при сварке [1, 8]. Данное обстоятельство имеет важное значения при сварке тугоплавких металлов, когда значительно увеличивается нагрузка на инструмент и, соответственно, растёт степень его износа. Традиционное решение этой проблемы заключается в применении предварительного подогрева металла непосредственно перед движущимся инструментом. За счет этого происходит уменьшение

усилия на инструмент и заготовку, что позволяет увеличить скорость сварки. В совокупности это ведет к повышению ресурса инструмента.

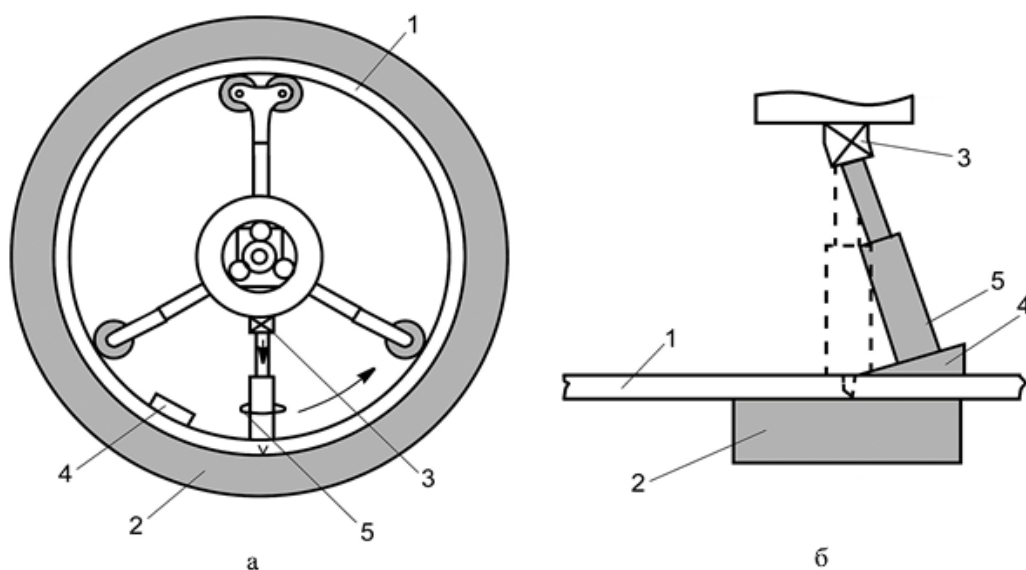
В начале сварки наконечник постепенно внедряется на нужную глубину, а в конце процесса сварки, после того как начало шва повторно было переварено, наконечник постепенно выводится из металла согласно схеме, приведенной на рисунке 6.

Использование в качестве технологической планки клинообразной пластины для вывода сварочного инструмента (рис. 7 и 8) также открывает возможности сварки как снаружи, так и изнутри изделий цилиндрической формы.



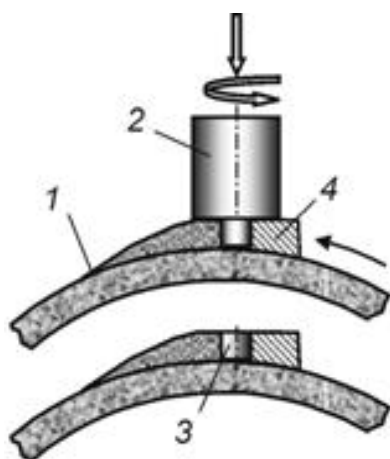
1 — заплечик; 2 — свариваемая заготовка; 3 — наконечник; 4 — наконечник, движущийся вниз; 5 — сваренная заготовка; 6 — наконечник в требуемом положении для сварки; 7 — наконечник, движущийся вверх; а — направление вращения наконечника; б — направление вращения заплечика; с — направление сварки

Рисунок 6 — Схема СТП по технологии с раздельным движением наконечника и заплечика (ГОСТ ISO 25239-1-2020)



а и б — вид в поперечном сечении и продольном сечении изделия соответственно;
1 — изделие (труба); 2 — опорное кольцо в роли подкладки; 3 — шарнирное соединение;
4 — клиновидная пластина для вывода инструмента; 5 — сварочный инструмент

Рисунок 7 — Схема СТП кольцевого соединения изнутри изделия цилиндрической формы [9]



1 — кольцевой шов; 2 — сварочный инструмент;
3 — отверстие, остающееся после вывода инструмента; 4 — клиновидная пластина для вывода инструмента

Рисунок 8 — Схема СТП кольцевого соединения снаружи изделия цилиндрической формы

Существуют также и другие технологии СТП, например *Re-Stir™* и *Skew-Stir™* [10], где за счет режимов движения и геометрии инструмента оказывается непосредственное воздействие на внутреннюю структуру и ширину сварного шва.

Возможности СТП применительно к сварной конструкции воздушной фурмы. В сварной конструкции воздушной фурмы доменной печи, чертеж которой приведен на рисунке 9, предусмотрено два прямолинейных и четыре (два наружных и два внутренних) кольцевых сварных соединения. Прямолинейные соединения используются при изготовлении наружного конуса 1 и внутреннего стакана 2. Кольцевые соединения используются для сварки конуса и стакана с рьлом 3 и фланцем 4.

Выполненный анализ способов СТП и особенностей получаемых сварных соединений определил ряд следующих требований к решению технологических проблем сварки воздушных фурм доменных печей:

- все сварные соединения фурмы должны быть наружными, т. к. размеры деталей фурм значительно меньше размеров используемых сварочных инструментов и шпинделей, чтобы иметь возможность выполнять СТП изнутри фурмы;

- кольцевые сварные соединения наружного конуса с рьлом и фланцем должны иметь нахлесточно-стыковой тип (см. рис. 1, б), что позволяет исключить исполь-

зование опорных колец в роли подкладок, т. к. сами детали фурмы — рыло и фланец — могут выполнять роль подкладки;

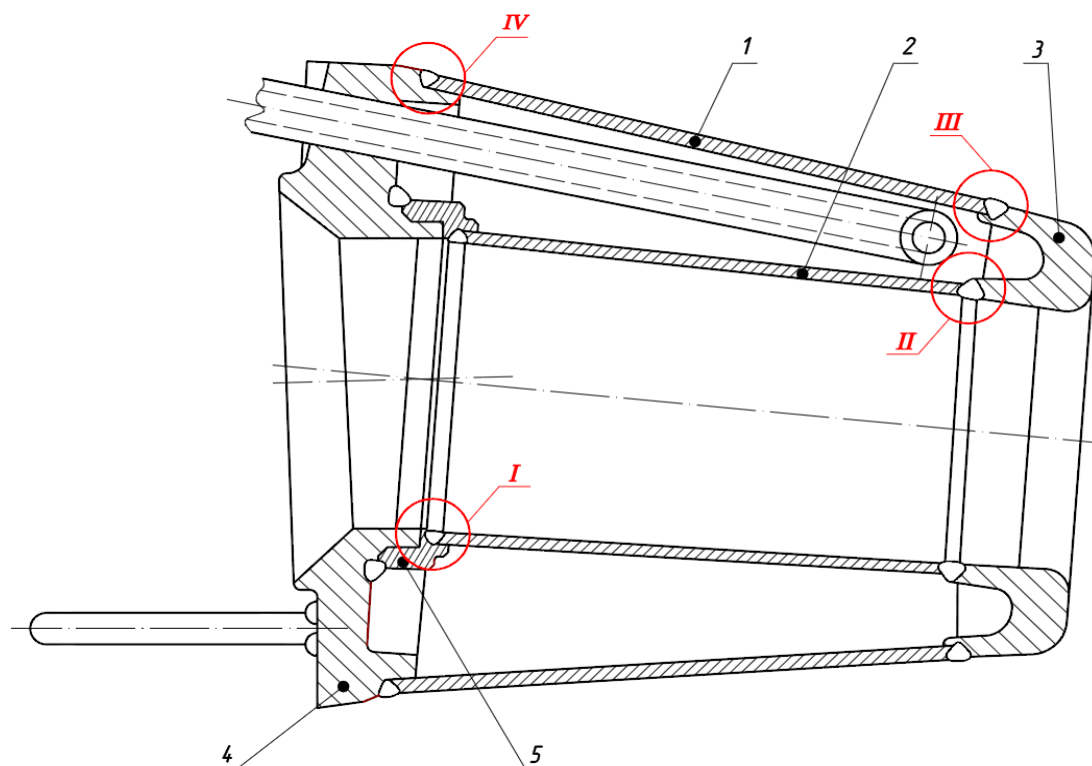
– кольцевые сварные соединения внутреннего стакана с рылом и фланцем должны иметь стыковой тип (см. рис. 1, а), что потребует использования достаточно простых опорных колец в роли подкладок;

– для кольцевых сварных соединений необходимо использовать сварочный инструмент с изменяемой геометрией, что исключает использование клиновидных пластин для вывода инструмента.

Выполнение кольцевых сварных швов с применением СТП, независимо от того, будет ли использоваться сварочный инструмент с изменяемой геометрией или клиновидная технологическая пластина, обуславливает необходимость применения специализированных сварочных машин (рис. 10, а) или роботизированных сварочных голо-

вок (рис. 10, б). В первом случае машина (головка) должна обеспечивать раздельное движение наконечника и заплечика, а во втором случае — обеспечивать автоматическую установку и крепление клиновидной пластины, а также задавать соответствующую траекторию движения инструмента.

Например, концерн ESAB разработал серию сварочных машин Legio™ (см. рис. 10, а) для сварки алюминия и других цветных металлов. Серия состоит из семи различных типоразмеров и пяти базовых моделей компоновок: модели S, ST, U, UT — с одной сварочной головкой, а модель ST-с — с двумя головками. Модели S и ST представляют собой установки для сварки прямолинейных швов (по двум координатным осям), модели U и UT — для сварки 2-D швов (по трем координатным осям), а модель ST-с — для сварки полых профилей.



1 — медный наружный конус; 2 — стальной внутренний стакан; 3 — рыло из меди;
4 — стальной фланец; 5 — стальная втулка

Рисунок 9 — Вертикальное сечение воздушной фурмы, изготавливаемой методом сварки

Концерн ESAB также разработал роботизированную систему СТП Rosio™ (см. рис. 10, б), которая обеспечивает гибкую перенастройку для получения сварных соединений сложных конструкций, предпочтительно из алюминия. Такое решение позволяет выполнять сварные швы в произвольном направлении трехмерного рабочего пространства. В основе системы используется роботизированный манипулятор ABB IRB 7600, модифицированный для СТП с системой управления IRC5. Сварочная головка интегрирована в механическую конструкцию манипулятора, не ограничивая стандартную рабочую зону робота. Доступное рабочее пространство робота занимает более 2,5 м, на которое во

время сварки может быть приложено прижимное усилие до 13 кН.

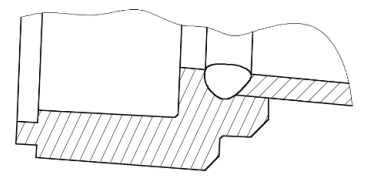
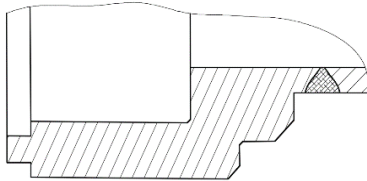
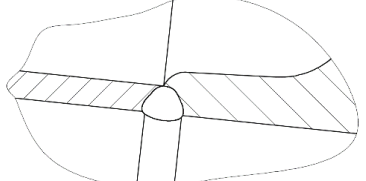
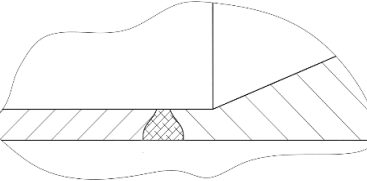
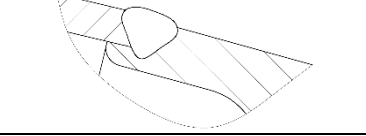
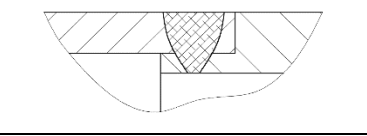
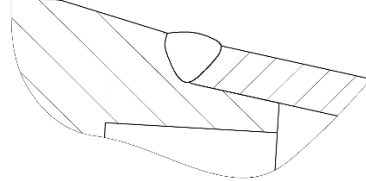
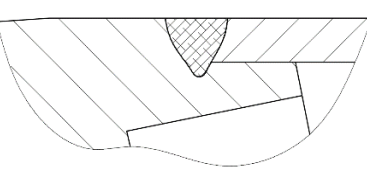
Обе установки успешно применяются в космическом и авиастроении, автомобилестроении, судостроении, энергетике и многих других отраслях промышленности.

С учетом вышеизложенных результатов анализа в таблице 1 приведены предполагаемые модификации сварных соединений сварной конструкции воздушных фурм под применение технологии СТП.

В дальнейшем под конкретную сварную конструкцию воздушной фурмы доменной печи и задействованную сварочную машину (головку) необходимо спроектировать специальные прижимные устройства.

Таблица 1

Модификация сварных соединений сварной конструкции воздушных фурм доменных печей под применение СТП

Сварное соединение воздушной фурмы (рис. 9)			Схема сварного соединения, выполняемого СТП	
вид	чертеж	тип	схема	тип
I		кольцевой внутренний		стыковой наружный
II				
III		кольцевой наружный		нахлесточно- стыковой наружный
IV				

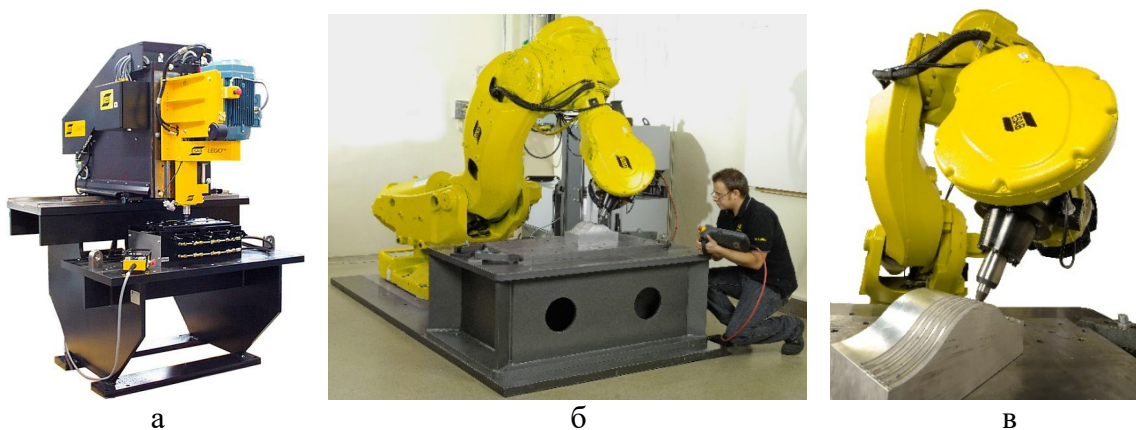


Рисунок 10 — Внешний вид сварочной машины Legio™ (а) и роботизированной сварочной головки Rosio™ (б, в), предлагаемых концерном ESAB [11]

Заключение. С точки зрения применения СПП для изготовления сварной конструкции воздушной фурмы доменной печи возникает ряд сложных конструкторско-технологических задач. Конструкторские задачи связаны, во-первых, с изменением типа сварных соединений воздушной фурмы (главным образом необходимо использовать только наружные сварные соединения), а во-вторых, с разработкой технологической оснастки (опорно-прижимных

устройств, сварочного инструмента с изменяемой геометрий) и адаптацией сварочной машины (головки) под конкретные размеры изготавливаемой воздушной фурмы. Технологические задачи в основном связаны с разработкой геометрии наконечника сварочного инструмента и выбором рациональных режимов сварки однородных соединений из меди и разнородных соединений «медь — сталь», характерных для сварной конструкции воздушной фурмы.

Библиографический список

1. Котлышев Р. Р. Сварка трением с перемешиванием. Ростов н/Д : Изд. центр ДГТУ, 2012. 137 с.
2. Устройство и проектирование доменных печей : учебное пособие / Л. И. Каплун [и др.]. Екатеринбург : УрФУ, 2016. 219 с.
3. Стаценко В. Н. Тепловые процессы при сварке трением с перемешиванием. Владивосток : Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022. 120 с.
4. Сотников А. Л., Мухоматов А. А., Орлов А. А. Классификация методов неразрушающего контроля сварных соединений из меди, полученных сваркой трением с перемешиванием // Сварка и диагностика. 2022. № 3. С. 19–24. DOI: 10.52177/2071-5234_2022_03_19.
5. Thomas W. M. Friction stir welding — process variants // TWI : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-process-variants-an-update-october-2007> (дата обращения: 01.03.2023).
6. Staines D. J. The simultaneous use of two or more friction stir welding tools [Электронный ресурс] // TWI : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-simultaneous-use-of-two-or-more-friction-stir-welding-tools-january-2005> (дата обращения: 01.03.2023).
7. Седерквист Л. Сварка на тысячелетия. Ротационная сварка трением применяется для заварки медных контейнеров с толщиной стенки 50 мм, используемых для хранения радиоактивных отходов Швеции // Svetsaren. 2005. № 2. С. 31–33.
8. Фрикционная сварка алюминиевых лайнеров металлокомпозитных баллонов высокого давления / В. А. Половцев [и др.] // Сварочное производство. 2007. № 12. С. 24–27.

9. Thomas W. M. Friction stir welding developments (April 2002) [Электронный ресурс] // TWI : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-developments-april-2002> (дата обращения: 01.03.2023).

10. Consonni M. Processi di saldatura ad energia concentrata e FSW [Электронный ресурс] // TWI : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/italian/recenti-sviluppi-nei-processi-di-saldatura-ad-energia-concentrata-e-friction-stir-welding> (дата обращения: 01.03.2023).

11. Brennan M. Friction stir welding expands its scope [Электронный ресурс] // The Fabricator : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/shopmanagement/friction-stir-welding-expands-its-scope> (дата обращения: 01.03.2023).

© Сотников А. Л., Пасечник С. Ю.

© Вишнеvский Д. А., Орлов А. А.

© Каленская А. В., Муховатый А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ОМД ДонНТУ Снитко С. А.,
д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.

Статья поступила в редакцию 25.05.2023.

Doctor of Technical Sciences Sotnikov A. L., PhD in Engineering Pasechnik S. Yu. (Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, the Russian Federation), **Doctor of Technical Sciences Vishnevskiy D. A., Orlov A. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation), **PhD in Engineering Kalenskaia A. V., PhD in Engineering Mukhovaty A. A.** (Lugansk State University named after V. Dahl, Lugansk, LPR, the Russian Federation)

TECHNOLOGICAL FEATURES OF FRICTION STIR WELDING THE AIR TUYERES OF BLAST FURNACES

Analysis of methods of friction stir welding from the position of solving technological problems of welding air tuyeres of blast furnaces is carried out. The problems solution lies in changing the design of welded air tuyere joints so that it is possible to use friction stir welding, using a welding tool with variable geometry and a specialized welding machine or a robotic welding head.

Key words: air tuyere, friction stir welding, welding tool, type of welded joint, welding machine, welding head.

References

1. Kotlyshev R. R. Friction stir welding [Svarka treniem s peremeshivaniem]. Rostov-on-Don: Publishing House of DSTU, 2012. 137 p. (rus)

2. Kaplun L. I. Blast furnace installation and design: study letter [Ustrojstvo i proektirovanie domennyh pechej: uchebnoe posobie]. Ekaterinburg: UrFU, 2016. 219 p. (rus)

3. Statsenko V. N. Thermal processes during friction stir welding [Teplovye processy pri svarke treniem s peremeshivaniem]. Vladivostok: Publishing House of FEFU, 2022. 120 p. (rus)

4. Sotnikov A. L., Muhovatyj A. A., Orlov A. A. Classification of non-destructive testing methods for welded compounds from copper obtained by agitation friction welding [Klassifikaciya metodov nerazrushayushchego kontrolya svarnyh soedinenij iz medi, poluchennyh svarkoj treniem s peremeshivaniem]. Svarka i Diagnostika. 2022. No. 3. Pp. 19–24. (rus)

5. Thomas W. M. Friction stir welding — process variants. Tokyo, Japan, 2007. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-process-variants-an-update-october-2007>. (date of treatment 01.03.2023).

6. Staines D. J. The simultaneous use of two or more friction stir welding tools. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-simultaneous-use-of-two-or-more-friction-stir-welding-tools-january-2005>. (date of treatment 01.03.2023).

7. Sederkvist L. Millennium Welding. Friction stir welding is used to weld copper containers with a wall thickness of 50 mm used to store radioactive waste in Sweden [Svarka na tysyacheletiya. Rotacionnaya svarka treniem primenyaetsya dlya zavarki mednyh kontejnerov s tolshchinoj stenki 50 mm, ispol'zuemyh dlya hraneniya radioaktivnyh othodov Shvecii]. Svetsaren. 2005. No. 2. Pp. 31–33. (rus)

8. Polovtsev V. A., Makarov N. V., Shilo G. V. et al. Friction welding of aluminum liners of high-pressure metal composite cylinders [Frikcionnaya svarka alyuminiyevyh lajnerov metallokompozitnyh ballonov vysokogo davleniya]. Svarochnoe proizvodstvo. 2007. No. 12. Pp. 24–27. (rus)

9. Thomas W. M. Friction stir welding developments (April 2002). 6-th International Conference on Trends in Welding Research. USA, Georgia, 2002. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-developments-april-2002> (date of treatment 01.03.2023).

10. Consonni M. Processi di saldatura ad energia concentrata e fsw. Giornate Nazionali della Saldatura 4. Italy, Genova, 2007. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/italian/recenti-sviluppi-nei-processi-di-saldatura-ad-energia-concentrata-e-friction-stir-welding> (date of treatment 01.03.2023).

11. Brennan M. Friction stir welding expands its scope. URL: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/shopmanagement/friction-stir-welding-expands-its-scope> (date of treatment 01.03.2023).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сотников Алексей Леонидович, д-р техн. наук, профессор каф. механического оборудования заводов черной металлургии

Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, РФ

Пасечник Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент каф. цветной металлургии и конструкционных материалов

Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, РФ

Вишневский Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Орлов Андрей Андреевич, ассистент каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Каленская Анна Васильевна, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением и сварки

Луганский государственный университет имени Владимира Даля,
г. Луганск, Луганская Народная Республика, РФ

Муховатый Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доцент каф. машиноведения

Луганский государственный университет имени Владимира Даля,
г. Луганск, Луганская Народная Республика, РФ

УДК 531.31.15

¹Снитко С. А., ²Вишневский Д. А., ²Зинченко А. М.¹Донецкий национальный технический университет,²Донбасский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ НАГРУЗОК ДВУХВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ

Работа посвящена исследованиям рабочих нагрузок двухвалковой зубчатой дробилки при переработке агломерата, углей и сланцев. Исследовано влияние на возникающие силы и крутящие моменты основных параметров дробилки.

Ключевые слова: сила, нагрузка, двухвалковая зубчатая дробилка, крутящий момент, крупное дробление.

Одной из разновидностей валковых дробилок являются машины с двумя валками, которые могут быть выполнены как гладкими, так и с выступами различной формы, а также в виде зубьев [1, 2].

Так, например, в металлургической отрасли широкое применение нашли одновалковые и двухвалковые зубчатые дробилки для фракционной подготовки предварительно спечённой железной руды в виде агломерационного пирога, а также иных материалов. При этом основным преимуществом двухвалкового исполнения является лучшее условие разрушения, которое может осуществляться даже при не имеющем возможности вращения одном из валков. Кроме того, наличие даже коротких зубьев (выступов) на поверхностях валков обеспечивает лучший способ захвата перерабатываемого материала [3, 4].

Однако наличие значительных усилий дробления передаётся на валы и подшипниковые опоры [5], что существенно ужесточает требования к их надёжности, поэтому актуальными являются не только аналитическое прогнозирование и расчёт таких узлов, но и практическое исследование и испытание рассматриваемых дробилок в производственных условиях.

Для наглядности на рисунке 1 показана схема действующих на материал сил.

В технике дробления, измельчения и обогащения полезных ископаемых наиболее актуальным является решение вопро-

сов повышения производительности, сокращение стадий переработки сырья, повышения надёжности, снижения удельной энергоёмкости и повышения качества готового продукта [6], что частично может достигаться аналитическими путями, однако пока ещё требует испытаний машин в производственных условиях.

Постановка задач: экспериментальные исследования условий возникновения и определения нагрузок в рабочей зоне двухвалковой зубчатой дробилки.

Исследуемая дробильная машина ДДГ-10 предназначена для крупного дробления исходного материала с размерами $400 \times 600 \times 1000$ мм, например углей и сланцев, имеющих твёрдость по шкале Мооса 4–5 единиц, до крупности $(0 \times 100 \times 300)$ мм.

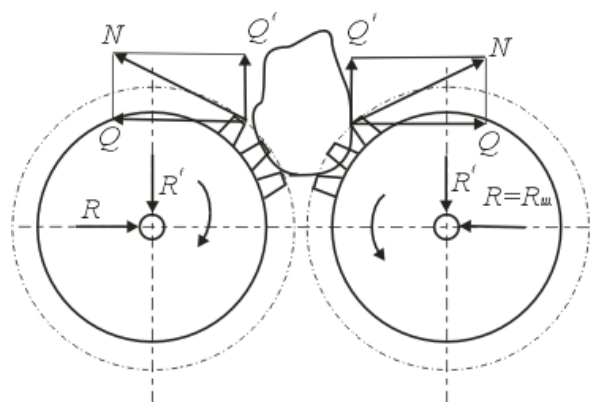


Рисунок 1 — Схема действующих на материал сил

Дробилка ДДГ-10 представляет собой двухвалковую зубчатую конструкцию, состоящую из следующих механизмов: вал вращающийся подвижный; вал вращающийся неподвижный; передаточный механизм; устройство амортизирующее.

Подвижный и неподвижный валы оснащены сегментами с зубьями и установлены в роликовых сферических (самоустанавливающихся) подшипниках. Передаточный механизм состоит из клиноременной передачи и закрытой зубчатой цилиндрической передачи. Соединение ведомого шкива клиноременной передачи с валом осуществляется посредством шариковой предохранительной муфты.

Ведомый шкив является также маховиком в механизме привода. Передача движения между неподвижным и подвижным валами осуществляется зубчатой цилиндрической передачей с внутренним зацеплением. При изменении межосевого расстояния между валами зацепление достигается применением зубчатого параллелограммного механизма. Амортизирующее устройство предназначено для отодвигания подвижного вала при попадании в рабочую зону недробимых или труднодробимых предметов и последующего его возврата в исходное положение. В качестве амортизирующих элементов установлены наборы витых цилиндрических пружин.

Основные технические характеристики машины приведены в таблице 1.

Исследование работы дробилки ДДТ-10 производилось при дроблении сланца твёрдостью 4–5 по Протодяконову. Межосевое расстояние валков составляет 1080 мм. Дробилка работала совместно с ранее установленной зубчатой дробилкой. Загрузка обеих дробилок осуществлялась с одного конвейера, при этом происходило разделение сланца: крупные куски размером 300×400 мм и более поступали для измельчения в дробилку ДДГ-10. Таким образом, загрузка исследуемой дробилки носит периодический характер.

Обработка и анализ результатов измерения показал, что распорные усилия на штоки амортизирующего устройства достигают 60–80 кН, момент на приводном валу не превышает 1350 Нм, время действия которого составляло 0,5–0,8 секунды. Анализ записи тока (рис. 2) и мощности электродвигателя позволил создать график нагрузки дробилки, а также определить коэффициент рабочего времени, характеризующий чистое время нахождения дробилки под нагрузкой.

Коэффициент рабочего времени

$$K = \frac{N \cdot t}{60 \cdot T} = \frac{9300 \cdot 0,5}{60 \cdot 0,5} = 0,016, \quad (1)$$

где $N=9300$ — среднее значение количества импульсов нагрузки за 8 часов работы дробилки; $t=0,5$ с — среднее значение длительности импульса нагрузки; $T=8$ часов — время работы дробилки.

Таблица 1

Технические характеристики двухвалковой дробилки

Параметр	Значение параметра
Диаметр валков, мм	1000
Длина валков, мм	1250
Межосевое расстояние, мм	1100–1350
Пределы регулирования щели, мм	100–350
Максимальный отход подвижного валка, мм	300
Скорость вращения валков, об/мин	36
Передаточное число передаточного механизма	20,44
Мощность электродвигателя, кВт	40
Производительность дробилки определяется крупностью поступающего и дроблёного материала и составляет, т/час	125–525

Измерение нагрузки электродвигателя при длительном режиме работы проводилось самопишущим ампервольтметром Н 390 с шириной применяемой ленты 100 мм, что соответствует потребляемому двигателем току 200 А (рис. 2).

При помощи тензометрии определялся крутящий момент на приводном валу.

Основные динамические характеристики работы дробилки показаны в таблице 2, а показатели определения мощности электродвигателя — в таблице 3.

Изменение мощности электродвигателя показано на рисунке 3, а график нагрузки дробилки — на рисунке 4.

Исследование шума, возникающего при дроблении, выявило, что максимальный уровень звукового давления в 110 дБ находится в среднечастотном диапазоне спектра. В высокочастотном диапазоне от 1000 до 5000 Гц уровень звукового давления у станины дробилки составляет 86–92 дБ. На хо-

лостом ходу максимальный уровень шума 81–84 дБ; он вызывается вибрациями вследствие динамических нагрузок в элементах привода, основным источником которого являются зубчатые передачи. Рабочий режим характеризуется резким понижением шума.

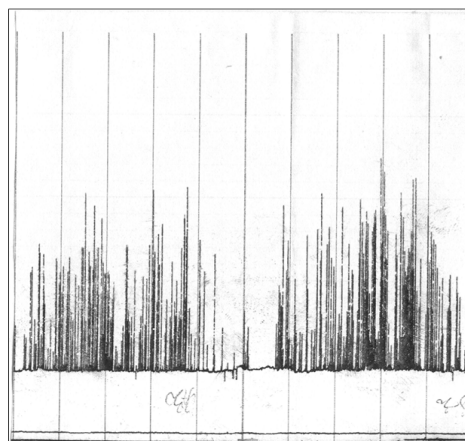


Рисунок 2 — Диаграмма тока двигателя дробилки

Таблица 2

Основные динамические характеристики работы дробилки

Давление на левый шток, $P_{ш1}$, кН	Давление на правый шток, $P_{ш2}$, кН	Суммарное распорное усилие, P , кН	Величина хода подвижного вала, мм	Продолжительность действия нагрузки, с	Крутящий момент на приводном валу, M_e , кНм
25,20	18,30	43,50	1,0	0,3	9,10
15,80	13,00	28,80	0,0	0,2	3,60
31,20	11,00	42,20	0,3	0,3	8,60
34,80	35,20	70,00	2,0	0,5	10,30
19,40	12,00	31,40	0,2	0,2	3,95
22,00	23,00	45,00	0,3	0,3	9,60
44,00	33,00	77,00	4,0	0,4	12,90
50,50	17,50	68,00	5,0	0,5	12,70
16,00	11,00	27,00	0,2	0,2	3,30
57,00	33,00	90,00	2,5	0,5	13,20
66,00	41,00	107,00	15	0,6	13,50
51,00	37,50	88,50	4,0	0,4	13,00
50,50	41,50	92,00	5,0	0,5	13,20
62,30	53,00	115,30	7,5	0,2	13,10

Таблица 3
Показатели определения мощности
электродвигателя

Ординаты мгновенной мощности, мм		Мгновенная мощность двигателя, кВт	Ток двигателя	
y_1	y_2		холостого хода, I_{xx} , А	при нагрузке, $I_{об}$, А
9	2,5	42,7	38	166
10,5	2,5	52,6		122
5,5	2,5	19,8		132
6	2,5	23		128
6,5	2,5	26,3		120
7,5	2,5	32,9		116
8	2,5	36,2		134
12	2,5	62,5		120
7,5	2,5	32,9		115
6,5	2,5	26,3		104
5	2,5	16,5		135
7	2,5	29,6		100
5,5	2,5	46		130

Проведенные исследования показали, что загрузка электродвигателя находится на уровне его установленной мощности, наибольшая величина которой достигает 52,6 кВт. Основным источником шума является кожух и загрузочное устройство, что может быть компенсировано устройством соответствующей шумоизоляции и повышения точности изготовления зубчатых передач.

Библиографический список

1. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата : монография / О. А. Левченко [и др.]. Алчевск : ДонГТУ, 2016. 190 с.
2. Жилкин В. П., Доронин Д. Н. Производство агломерата, оборудование, автоматизация. Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2004. 292 с.
3. Левченко О. А., Левченко Э. П., Зинченко А. М. Состояние и основные направления развития технического уровня конструкций одновалковых зубчатых дробилок // *Металлургические процессы и оборудование*. 2011. № 1. С. 24–29.
4. Левченко Э. П., Зинченко А. М., Левченко О. А. Основы синтеза инновационных технологических процессов, механических устройств и систем (опыт 30-летней изобретательской деятельности) : монография. Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. 353 с.

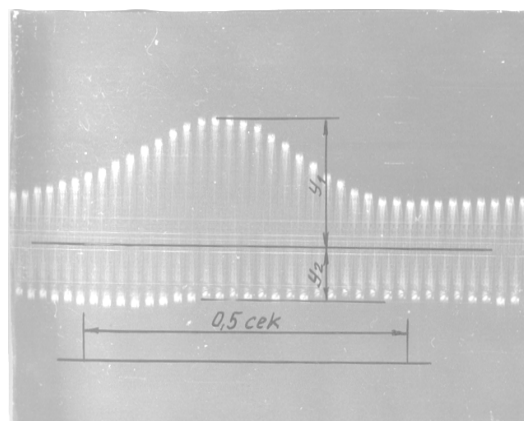


Рисунок 3 — Изменение мощности двигателя дробилки

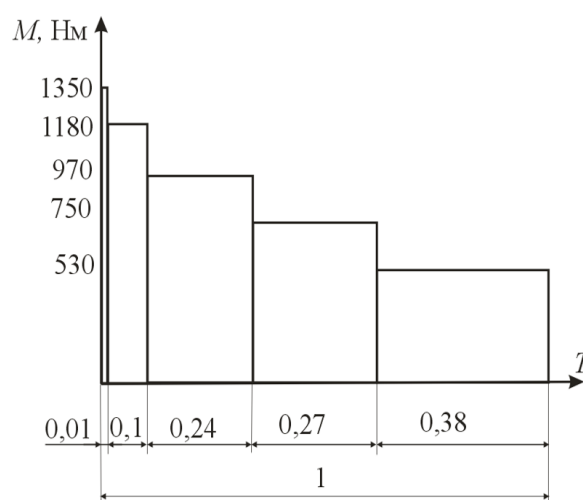


Рисунок 4 — График нагрузки дробилки

В качестве перспектив развития данного направления исследований предполагается определение прочностных характеристик основных деталей данной машины.

5. Левченко Э. П., Щербак В. В. Определение рациональной скорости загрузочного конвейера рудно-дробильного комплекса // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2010. Вып. 32. С. 227–233.

6. Малич Н. Г., Блохин В. С., Дегтярёв А. О. Анализ и перспективы развития отечественных машин для дробления твёрдых материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. С. 365–380.

7. Блохин В. С., Большаков В. И., Малич Н. Г. Основные параметры технологических машин. Ч. 1. Машины для дезинтеграции твёрдых материалов : учебное пособие. Днепропетровск : ИМА-пресс, 2006. 404 с.

© Снитко С. А.

© Вишневецкий Д. А., Зинченко А. М.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛГУ им. В. Даля Замотой Т. Н., к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТУ Смекалин Е. С.

Статья поступила в редакцию 20.06.2023.

Doctor of Technical Sciences Snitko S. A. (Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, the Russian Federation), **Doctor of Technical Sciences Vishnevskiy D. A., PhD in Economics Zinchenko A. M.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation)

INVESTIGATING THE WORKLOADS OF A DOUBLE ROLL GEAR CRUSHER

The work is devoted to the research of the workloads of a double roll gear crusher during the processing of agglomerate, coal and shale. The influence of the main crusher parameters on the emerging forces and torques is studied.

Key words: force, loading, double roll gear crusher, torque, coarse breaking.

References

1. Levchenko O. A. Development of technical level of single-roll gear crushers of hot agglomerate: monograph [Razvitie tekhnicheskogo urovnya odnovalkovykh zubchatykh drobilok goryachego aglomerata: monografiya]. Alchevsk: DonSTU, 2016. 190 p. (rus)

2. Zhilkin V. P., Doronin D. N. Sinter production, equipment, automation [Proizvodstvo aglomerata, oborudovanie, avtomatizatsiya]. Ekaterinburg: Uralskiy centr PR i reklamy. 2004. 292 p. (rus)

3. Levchenko O. A., Levchenko E. P., Zinchenko A. M. State and main directions of development of the technical level of single-roll gear crushers designs [Sostoyaniye i osnovnyye napravleniya razvitiya tekhnicheskogo urovnya konstruktsiy odnovalkovykh zubchatykh drobilok]. Metallurgical Process and Equipment. 2011. No. 1. Pp. 24–29. (rus)

4. Levchenko E. P., Zinchenko A. M., Levchenko O. A. Fundamentals of synthesis of innovative technological processes, mechanical devices and systems (experience of 30 years of inventive activity): monograph [Osnovy sinteza innovatsionnykh tekhnologicheskikh processov, mekhanicheskikh ustrojstv i sistem (opyt 30-letnej izobretatel'skoj deyatel'nosti): monografiya]. Alchevsk: SEI HPE LPR "DonSTU", 2018. 353 p. (rus)

5. Levchenko E. P., Shcherbak V. V. Determining the rational speed of the loading conveyor of the ore-crushing complex [Opredelenie racional'noy skorosti zagruzochnogo konvejera rudno-drobit'nogo kompleksa]. Scientific works collection of DonSTU. Vol. 32. 2010. Pp. 227–233. (rus)

6. Malich N. G., Blokhin V. S., Degtarev A. O. Analysis and prospects for the development of domestic machines for crushing solid materials [Analiz i perspektivy razvitiya otechestvennykh mashin dlya drobleniya tvordykh materialov]. Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2008. Pp. 365–380. (rus)

7. Blokhin V. S., Bol'shakov V. I., Malich N. G. Basic parameters of technological machines. P. 1. Machines for disintegration of solid materials: a handbook [Osnovnyye parametry tekhnologicheskikh mashin. Ch. 1. Mashiny dlya dezintegratsii tvordykh materialov: uchebnoye posobie]. Dnepropetrovsk: IMA-press. 2006. 404 p. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Снитко Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. обработки металлов давлением

Донецкий национальный технический университет,

г. Донецк, Донецкая Народная Республика, РФ

Вишневский Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Зинченко Андрей Михайлович, канд. экон. наук, доцент, зав. каф. технологии и организации машиностроительного производства

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

УДК 621.926

Литвинский Г. Г.

Донбасский государственный технический университет

E-mail: ligag@ya.ru

**УДАРНАЯ ЩЕКОВАЯ ДРОБИЛКА С ГИДРОПРИВОДОМ
(ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ)**

Проведен краткий анализ предыстории развития техники и технологии дробления материалов. Выявлены технические противоречия и раскрыты до сих пор не преодоленные недостатки дробильных и измельчительных машин (ДИМ). Намечены перспективные пути преодоления технических противоречий и сформулирован комплекс требований, вытекающих из анализа работы существующих ДИМ. Предложена новая конструкция для наиболее распространенного типа ДИМ — ударная щековая дробилка с гидроприводом. Принципиально новым конструктивным элементом новой щековой дробилки является колосниковая дробильная плита с ударными клиньями, образующими ортогональную решетку с проемами по всей площади. Рассмотрен и обоснован вариант модернизированной ударной щековой дробилки, в которой реализован принцип конструктивной симметричности и силовой уравновешенности. Исследованы особенности работы ударной дробилки с гидроприводом и разработана методика расчета ее параметров.

Ключевые слова: щековая дробилка, гидропривод, ударный раскол, исполнительный орган, колосниковые плиты дробления, усилие динамического раскола, технические противоречия, ударные клинья, расчет параметров, кинематика и динамика дробления, срок службы, производительность, конструктивные и технологические параметры, технико-экономические преимущества.

1 Ретроспективный анализ развития техники для дробления материалов

Необходимость дробления различных материалов возникла вместе с появлением живых существ в доисторические времена. Для дробления и измельчения пищи природа снабдила многих животных зубами. Зубы явились первыми твердыми структурами в теле древнейших позвоночных, возникшими раньше других частей скелета. Палеонтологи узнали о возникновении позвоночных в конце палеозоя только потому, что от этого времени до нас сохранились лишь зубы, самый твердый природный «инструмент» разрушения [1].

Таким образом, зубы можно считать биологическим органом, приспособленным к дроблению, измельчению и перетиранию различной твердости пищевых материалов. Но далеко не всегда зубы могут осуществить раскол. Чтобы получить съедобные внутренние части от жесткой оболочки, уже в животном мире издавна использовалось дробление ударом. Так, орлы, чтобы расколоть панцирь черепахи, поднимают и бросают ее на скалы.

Вороны бросают вниз орехи, а шимпанзе в Африке (рис. 1) используют камни как орудие раскола орехов более 2 млн лет [2].

Эти плодотворные «изобретения» живой природы, проверенные и отобранные в процессе длительного эволюционного развития, люди пытались использовать в технике начиная со времен Леонардо да Винчи. Созданием технологических устройств, при котором идея и основные элементы устройства заимствуются из живой природы, занимается биомиметика (бионика) [3].

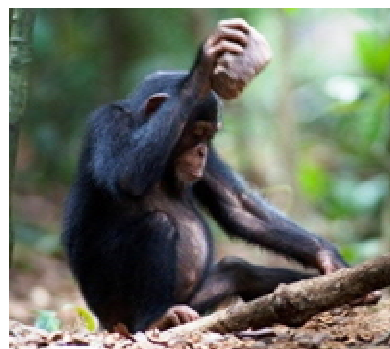


Рисунок 1 — Первичные акты дробления (прототип молотковой дробилки)

Проблема измельчения постоянно сопровождала человека в его стремлении удовлетворить свои потребности вначале в пище, а затем, по мере развития цивилизации, при решении разнообразных технических задач. Этим можно объяснить постоянное развитие особого направления в технике — дробильных и измельчительных машин (ДИМ), основанных на процессах разрушения материалов с целью контролируемого уменьшения их размеров. ДИМ находят широкое применение во многих отраслях промышленности, занятых добычей и переработкой сырьевых ресурсов: горной, металлургической, строительной, химической и др.

Вопросам дробления и измельчения посвящены многочисленные исследования, монографии, патенты и изобретения, число которых все возрастает [4–8 и др.]. Это свидетельствует не только об актуальности проблемы, но и далеко не завершеном процессе развития ее теоретических и экспериментальных основ.

Существующее большое разнообразие видов дробильно-измельчительных машин обусловлено, с одной стороны, разнородностью (разбросом) свойств исходных твердых материалов, а с другой — множеством противоречивых требований, предъявляемых к конечному продукту переработки. Возникают все новые запросы и требования к продуктам дробления, которые непрерывно усложняются и ужесточаются. Постоянно повышаются требования к кратности дробления, качеству конечного продукта, производительности, коэффициенту полезного действия, массово-энергетическим показателям конструкции и др. [4]. Этим обусловлена постоянная необходимость поиска более производительных и совершенных конструкций ДИМ, поскольку ни одна из них не может претендовать на безупречность.

Чтобы осуществить крупное и среднее дробление кускового материала повсеместно используются дробилки, работающие с использованием разных типов силовых воздействий. Последние можно перечислить в порядке увеличения затрат удельной энергии на разрушение материала: удар, раска-

лывание, надлом, сдвиг, раздавливание, истирание или их комбинации в разных сочетаниях. Так, удельные затраты энергии составляют от $0,2 \dots 1,0$ кВт·ч/м³ (для удара и раскалывания) до $10 \dots 15$ кВт·ч/м³ (для истирания) и более, т. е. изменяются в широких пределах в $10 \dots 25$ раз.

Ожидается, что в период с 2003 по 2033 год объем рынка дробилок будет расти высокими темпами. Переход к 4-му промышленному укладу, промышленной автоматизации и информационным технологиям в таких секторах, как горная, металлургическая и строительная промышленности, утилизации и переработки отходов, вызовет активное использование инновационных систем дробления.

Среди разнообразных классов ДИМ щековые дробилки издавна заняли ведущее место во многом из-за своей простоты, эффективности и сравнительно небольших энергозатрат (рис. 2). Однако резервы повышения их показателей работы далеко не исчерпаны.

Поэтому разработка новых конструкций, определение оптимальных рабочих режимов и, тем самым, повышение производительности щековых дробилок являются достаточно актуальной задачей.

Основная идея работы состоит в разработке такой конструкции щековой дробилки, в которой используется наименее энергоемкий процесс разрушения — ударное силовое воздействие, — минимизирующий переизмельчение материала и обеспечивающий максимально быстрое удаление его из рабочей зоны (камеры дробления).

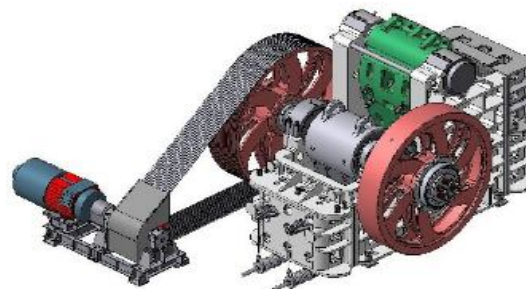


Рисунок 2 — Общий вид щековой дробилки с простым движением подвижной щеки типа ЩДП

Цель исследований — повысить эффективность работы щековой дробилки путем модернизации ее конструкции; **объект** — новая конструкция дробилки и ударная технология дробления; **предмет** — интенсификация происходящих в новой дробилке процессов дробления и методика расчета ее параметров.

Методика и основная идея — на основе функционального и ретроспективного анализа развития дробилок выявить технические противоречия и основные конструктивные недостатки щековых дробилок, перейти на более прогрессивный и наименее энергоемкий способ дробления ударным расколом с применением гидропривода.

Задачи исследований:

– выполнить функционально-технический анализ конструкций щековой дробилки и наметить направления их технико-экономического совершенствования;

– разработать конструктивные решения исполнительного органа нового технического уровня и соответствующего ему привода, позволяющих устранить существующие недостатки щековой дробилки;

– разработать метод расчета параметров конструкции и технологии ударного раскола новой дробилки.

2 Обзор технического уровня щековых дробилок

По конструкции и особенностям работы дробилки подразделяют на определенные типы: щековые, конусные, валковые, ударные (молотковые, роторные и дезинтеграторы) и центробежные [5].

Наиболее распространены благодаря своим достоинствам щековые дробилки (рис. 3). Их конструкция и принцип работы достаточно просты.

Дробилка состоит из литой или сварной станины 1, дробящих плит 2, подвижной щеки с дробящей плитой 4, подвешенной на оси 5, маховика 6, шатуна 8, установленного на эксцентриковом валу 7, винта 9 для подъема клина 10, нажимных плит 12

и тяги 13, обеспечивающей контакт между подвижной дробящей плитой 4, нажимными плитами 12, шатуном 8 и упорным клином 11.

Зонай измельчения является камера дробления, образованная дробящими плитами и боковыми стенками станины. Важной конструктивной частью дробилки является выпускная щель между броневыми плитами 2, лимитирующая производительность и кратность дробления материалов.

Подлежащий измельчению материал подается сверху в камеру дробления, которая имеет клиновидную форму и ограничена двумя противостоящими дробящими плитами с боковыми стенками: одна из плит (активная) подвижная, а вторая (пассивная) — неподвижная. Куски материала, попадая в клинообразную камеру дробления, распределяются по крупности сверху вниз и при периодических сближениях плит (ход сжатия) под действием привода разрушаются раздавливанием, расколом или истиранием. По мере разрушения в камере дробления куски опускаются под собственным весом и, достигнув требуемой степени дробления, в самом низу выходят из выпускной щели при раздвижке плит (холостом ходе).

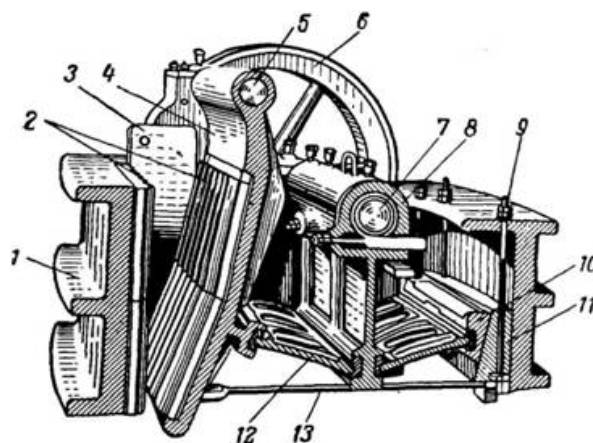


Рисунок 3 — Устройство щековой дробилки типа ЩДП¹

¹http://samlit.com/izmel/rabochie_elementy_shekovyh_drobilok.html

Исполнительным органом, предопределяющим затраты энергии на дробление и основные технико-экономические показатели дробилки, является пара взаимодействующих дробящих плит, стоимость которых часто превышает 30 % общих расходов на дробление. Они изготавливаются из высокопрочной износостойкой стали (типа стали Гатфильда). Рабочая поверхность дробящей плиты содержит рифления для лучшего захвата и дробления материала.

Щековые дробилки занимают важное место во многих отраслях промышленности. Из всех затрат в металлургической промышленности по переработке руды на процессы измельчения в щековых дробилках приходится около 40 % стоимости и до 60 % энергии [4].

К достоинствам щековых дробилок относятся простота конструкции, монтажа и демонтажа; широкий диапазон применения по твердости материала (вплоть до 300 МПа), его начальной крупности (до 2 м), кратности дробления (до 5–7) и вариации размеров выходной щели (от 250 до 5 мм). При этом мощность электродвигателя доходит до 500 кВт и более, а общая масса меняется от 5 до 500...1200 т [9, 10].

В то же время нельзя не отметить и недостатки этих дробилок, которые становятся явным тормозом на достигнутом этапе развития ДИМ:

- дробление пород происходит неконтролируемым сочетанием раздавливания, сдвигов, расколов и истирания в условиях стесненного и затрудненного удаления мелких фракций, что приводит к переизмельчению продукта и повышает энергетические потери;

- неравномерность нагрузок на привод дробилки, что вызывает высокие вибрации и требует установки массивных маховиков для их сглаживания и разгонного электродвигателя;

- строго периодические вибрации с частотой от 5 до 10 Гц, которые создает электропривод, способные вызвать резонансные колебания в окружающих машинах, конструкциях и вредные для персона-

ла, для которого самая опасная частота инфразвукового диапазона с 7 до 9 Гц;

- конструктивное ограничение производительности размерами выпускной щели между плитами, через которую необходимо пропустить весь поток дробленого материала под собственным весом только в период раздвижки плит;

- не всегда приемлемая форма продуктов дробления, в которых появляется фракция пластинчатой и игловатой конфигурации (до 50 %);

- склонность к блокированию рабочего пространства («пасти») негабаритными кусками породы (горной массы), особенно влажной, и при неравномерной ее подаче, «заклинивание» привода;

- быстрый неравномерный износ броневых плит, что требует их периодических ремонтов, замен и вызывает простои оборудования;

- высокий разброс гранулометрического состава крупной фракции выходного продукта, достигающий до 1,5 ширины выпускной щели;

- из-за необходимости обеспечения выгрузки готового продукта под действием собственного веса через выходную щель ограничена частота колебаний и тем самым снижено динамическое воздействие подвижной щеки на материал, что не позволяет осуществить более эффективное ударное его разрушение;

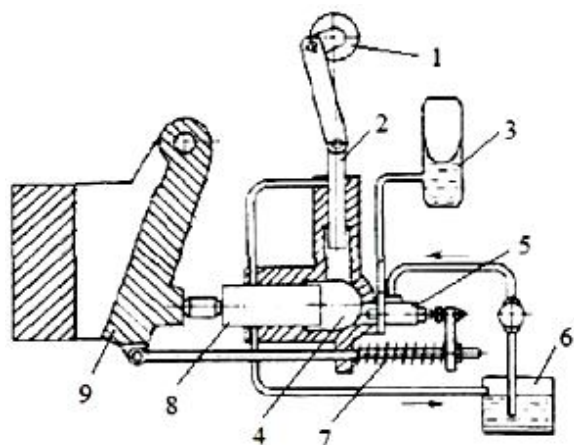
- угол раскрытия щёк должен быть менее двух углов трения материала по плитам из условия устранения выброса материала при его сжатии, что ограничивает рабочий объем и производительность дробилки.

Как видно из приведенного перечня, остается большой простор для улучшения конструкции щековых дробилок. Чтобы устранить хотя бы некоторые из этих недостатков, делались неоднократные попытки изменить конструкцию и повысить производительность щековых дробилок. Безусловно, одним из самых перспективных было направление замены электрического привода гидравлическим.

Видимо, первым щековую дробилку с гидравлическим приводом предложил канадец К. Гольди (K. Gauldie) еще в 19 веке. Дробилки общеизвестной фирмы «Голди» с гидроприводом в настоящее время обеспечивают безаварийный пропуск недробимого тела, что важно при переработке металлургических шламов [11]. Подобные технические решения предлагались и в отечественных разработках [12, 13 и др.].

Как видно из рисунка 4, щековая дробилка с гидроприводом копирует базовую конструкцию дробилок серии ЩДП. Тем не менее применение гидропривода позволяет повысить их производительность в 1,5 раза за счет уменьшения цикла качаний подвижной щеки при сохранении той же продолжительности периода открытия выходной щели.

Остальные недостатки щековой дробилки остаются неизменными и дают широкие возможности для дальнейших исследований и определяют их направленность с целью интенсификации ее работы.



1 — эксцентрик; 2 — плунжер; 3 — аккумулятор;
4 — цилиндр; 5 — клапан; 6 — ёмкость;
7 — пружина; 8 — поршень; 9 — подвижная щека

Рисунок 4 — Принципиальная схема щековой дробилки с гидроприводом²

3 Требования к конструкциям щековых дробилок

Основываясь на выполненном анализе работы щековых дробилок и тенденций их развития в общем тренде разработки новых способов дробления и направлений создания современных конструкций дробильно-измельчительных машин, можно сформулировать технические требования к идеальному конструкторскому объекту. Разумеется, выполнить эти требования в полной мере вряд ли возможно, но стремление к их соблюдению может, несомненно, дать толчок к разработке перспективных подходов для решения проблем ДИМ.

Если исключить банальные общетехнические требования (снизить стоимость, массу, эксплуатационные затраты, трудоемкость при одновременном повышении производительности, безопасности, экологичности и пр.) и перейти к конкретным параметрам, отражающим специфику работы машины, то к числу таких требований следует отнести:

1) реализацию в конструкции ДИМ преобладания наименее энергоемких способов разрушения материала исходя из их последовательной иерархии от наиболее экономного к самому затратному: раскол, раздавливание, изгиб, сдвиг, истирание;

2) обеспечение перехода от статических способов нагружения материала к динамическим (ударным и вибрационным), что гарантированно снижает энергоемкость дробления;

3) использование в процессе дробления и последующего измельчения одновременного воздействия на продукт дробления электромагнитных полей, токов и растворов ПАВ для побуждения внутримолекулярных сил, снижающих сцепление, когезию и прочность (эффекты Юткина, Ребиндера и др.);

4) осуществление замены электрического привода ДИМ гидравлическим, что способно заметно расширить и гибко регулировать диапазон изменения частоты и амплитуды силового воздействия на матери-

²<https://masters.donntu.ru/2014/fimm/simonenko/library/article1.htm>

ал при одновременном упрощении конструкции, снижении ее массы и габаритных размеров;

5) снижение неравномерности нагрузок от привода и высоких вынужденных вибраций конструкции, что позволит отказаться от установки массивных маховиков для их сглаживания;

6) устранение конструктивного ограничения на частоту колебания щёк и на производительность дробилки размерами выпускной щели между плитами, обеспечение беспрепятственного выхода всего потока продуктов дробления на всем пути их движения между щеками;

7) минимизацию разброса гранулометрического состава и фракции пластинчатой и игловатой (лещадной) конфигурации за счет формирования кубовидной формы продуктов дробления независимо от ширины выпускной щели;

8) увеличение объема рабочего пространства и производительности дробилки путем увеличения угла раскрытия щёк, исключение блокирования рабочего пространства («пасти») негабаритными кусками породы (горной массы);

9) продление срока службы вооружения (выступов) броневых плит, исключение простоев оборудования из-за их частых периодических ремонтов или замен.

Сформулированные требования позволяют дать ориентиры для вполне конкретных конструктивных изменений ДИМ и, в частности, щековой дробилки. На их основании были разработаны новые конструкторские варианты такой дробилки, в которых эти требования в определенной мере были реализованы.

4 Выбор исполнительного органа щековых дробилок

Наиболее ответственным и принципиально важным элементом любой конструкции, диктующим выбор всех остальных её параметров, является исполнительный орган, который, как сборочная единица, передает механическую энергию поступающим кускам дробимого материала.

Для щековых дробилок традиционной конструкцией, которая не меняется уже на протяжении многих десятилетий, является исполнительный орган в виде двух щёк (из которых одна может быть неподвижной) с броневыми плитами (рис. 2).

Недостатки такого типа исполнительного органа (разрушение материала не только расколом, но и раздавливанием с истиранием, износ броневых плит и необходимость их замены, переизмельчение материала, узкая выпускная щель и пр.) давно известны и воспринимаются как неизбежное зло. Поэтому давно назрела потребность в альтернативных конструкторских решениях.

Дискуссия о конструкции рабочего органа дробилок продолжается среди специалистов давно. Вначале преобладала точка зрения, что поверхность дробящих плит должна быть гладкой, особенно для мелко-го дробления. Однако такая конструкция весьма энергозатратна. Поэтому было предложено делать плиты с прямоугольными или треугольными выступами. Предусматривалось, чтобы выступы футеровок каждой из плит попадали во впадины другой для уменьшения усилий разрушения путем обеспечения процессов изгиба кусков при дроблении за счет снижения затрат энергии на раздавливание. Такие плиты могли несколько улучшать качество готового продукта. При этом оказалось, что ресурс таких дробящих плит заметно снижался из-за полного истирания выступов.

Добиться перехода к наиболее выгодному расколу материала при дроблении все равно не удавалось из-за чередующегося расположения выступов и впадин на плитах, что резко усиливало переизмельчение материала. А при оппозиционном расположении выступов куски дробимого материала заполняли узкие щели между выступами, что затрудняло опускание материала к выпускной щели и снижало производительность дробления. Накопление этих технических противоречий стало тормозом для развития ДИМ и заставляет пересмот-

реть базовые положения, лежащие в основе применяемых исполнительных органов.

В качестве нового типа исполнительного органа можно предложить конструкцию, основанную на идеях раскола пород с использованием пинч-эффекта [14, 15], в которой броневые плиты и щёки будут заменены одним элементом — плитами колосниковой конструкции в виде ортогонального крестового набора дробящих ударных клиньев *1*, расположенных взаимно перпендикулярно, и между которыми оставлены сквозные на всю толщину плит проемы *2* (рис. 5).

Колосниковая конструкция дробящих плит может иметь проемы *2* разной формы: квадратные, прямоугольные, круглые, эллиптические и др., которые обрамляются прямоугольной сеткой ударных клиньев *1*. Размер проемов задают в соответствии с проектным максимальным размером дробимого материала.

Возможны разные иерархии колосниковых структур дробящих плит, когда внутри ударных клиньев первого порядка могут быть расположены клинья второго порядка, между которыми предусмотрены соответствующие проемы для более мелких фракций дробления (рис. 6).

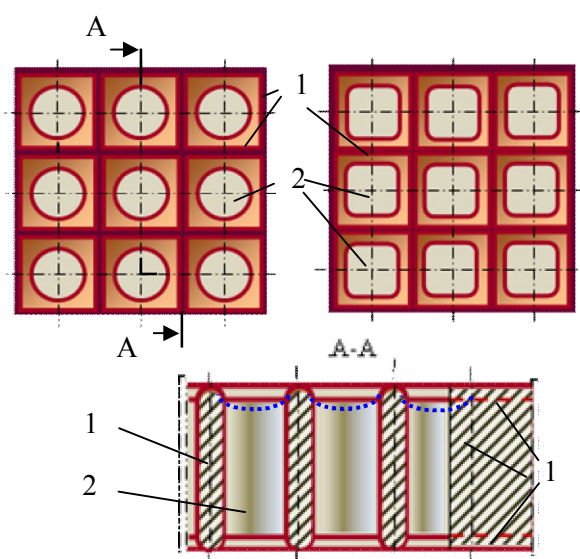


Рисунок 5 — Дробящие плиты колосниковой конструкции с проемами разной формы

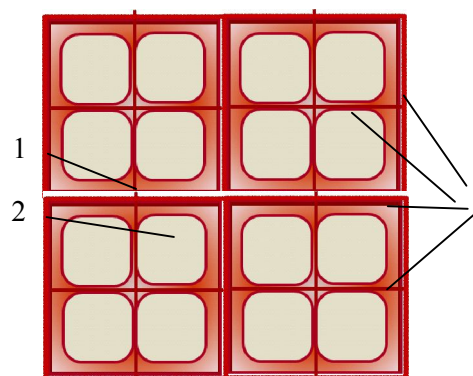


Рисунок 6 — Фрагмент дробящей плиты колосниковой конструкции с клиньями и проемами второго порядка

Отметим, что толщина колосниковых проемов внутри основной ячейки сот может быть заметно уменьшена. Это целесообразно для тех случаев, когда на одной дробилке необходимо получить высокую кратность дробления до 15–20 (вместо 4–6).

Дробящая плита предназначена для ударного разрушения материалов расколом, который осуществляют ударные клинья при рабочем ходе. При разрушении та часть материала, которая по своим размерам окажется равной или меньше заданного размера, оказывается захваченной и продавленной в пространство между клиньями, вбивается туда, через проемы выдавливается и удаляется из дробящей камеры, т. е. не подвергается дальнейшему разрушению. Для облегчения прохождения материала через проемы в колосниковых плитах они выполняются радиально расширяющимися (конусными) с уклоном $0,05 \dots 0,1$.

Оставшаяся более крупная по размеру часть дробимого материала после ударов и уменьшения размеров опускается под действием силы тяжести ниже, в дробящую камеру, где подвергается дальнейшей обработке ударными клиньями. Последние в процессе ударного воздействия по породе истираются, и происходит их самозаострение. Угол заострения оказывается переменным по длине клина: в центре пересечения клиньев он больше, а посередине между ними — острее.

Отметим еще одну особенность раскола кусков посредством предложенной конструкции дробящей колосниковой плиты. При разрушении куска под действием перекрестья клиньев раскол происходит вначале вдоль одного из клиньев, и при внедрении и заглуплении его в материал неизбежно вступит в силовой контакт соседняя кромка перпендикулярного ему клина, который создаст новый, перпендикулярный предыдущему раскол. Таким образом, новым отличительным признаком колосниковой дробящей плиты следует считать разрушение кусков материала путем образования взаимно перпендикулярных парных расколов. Следовательно, можно считать, что эффективность раскольного дробления значительно возрастет.

В процессе работы выступающие участки клиньев (крестообразные участки их пересечения) всегда воспринимают большие нагрузки от материала, поэтому на них истирание более интенсивное. Устанавливается подвижное равновесие при истирании и затуплении рабочих поверхностей клиньев, задаваемое ударными нагрузками и интенсивностью износа на разных участках. В итоге в процессе работы ударных клиньев они приобретают подвижную устойчивую равновесную форму и равновесное заострение.

Дробящие плиты колосниковой конструкции при износе сохраняют свою эффективность и работоспособность, поскольку при износе клиньев морфология поверхности дробящих плит самовоспроизводится и оказывается в динамическом равновесии с заданным сочетанием неровностей.

По мере износа клиньев толщина дробящих плит уменьшается, а их поверхность, приспособляясь к интенсивности и распределению нагрузок, постепенно изменяется, что приводит к уменьшению толщины плиты в целом.

Поэтому толщину плит выбирают из условия ее долговременной службы до достижения предельно минимальной толщины, которая определяется уровнем расчет-

ных нагрузок при работе дробилки. Запас толщины плит на износ может составлять для разных дробилок до 100...200 мм.

Если дробящие плиты выполнить разборными в виде четырех одинаковых составных элементов, то после износа их центральных участков производят переустановку центральных, наиболее изношенных участков плит на периферию камеры дробления, а на их месте в центре плиты окажутся сохранившиеся краевые участки элементов. Тем самым можно заметно продлить срок службы дробящих колосниковых плит без их замены на новые.

Исполнительный орган в виде дробящих плит колосниковой конструкции технологичен и может быть выполнен литьем. Наиболее предпочтительна конструкция колосниковых дробящих плит, когда по центру ударных клиньев предусмотрено формирование армирующего каркаса из высокопрочного материала.

Преимущества колосниковой дробящей плиты сводятся к следующему:

- менее массивная конструкция;
- за счет самозатачивания ударных клиньев обеспечивает ударные нагрузки и разрушение материала расколом, сводя к минимуму раздавливание и истирание;
- устраняет необходимость в выпускной щели, тем самым снимает существующие ограничения на производительность дробилки;
- выполняет функции грохота и отделяет фракции меньше заданной, освобождая камеру дробления от разрушенного материала, чем снижает затраты энергии на переизмельчение материала, повышает эффективность дробления и производительность дробилки;
- имеет свойства адаптации к особенностям распределения нагрузки и износа внутренней колосниковой поверхности;
- значительно повышает срок службы дробящих плит за счет большого их допустимого износа;
- модульная составная конструкция дробящих плит из четырех одинаковых

элементов позволяет заметно увеличить срок их эксплуатации.

На этом этапе мы завершим описание особенностей исполнительного органа дробилки колосниковой конструкции, хотя эта тема может быть углублена и продолжена. Можно с известной долей уверенности полагать, что новая конструкция исполнительного органа приведет к кардинальному пересмотру конструкции дробилки в целом и эмерджентно повысит ее технико-экономические показатели.

5 Новая конструкция щековых дробилок с гидроприводом

Учитывая указанные выше недостатки (п. 1) щековых дробилок и сформулированные к ним требования (п. 2), были разработаны на их основе различные схемы щековых дробилок. Известно, что дробящие плиты — их основной исполнительный орган, поэтому главным элементом в новой дробилке является новый исполнительный орган в виде колосниковых дробящих плит (см. п. 4).

Кроме того, вторым по важности элементом конструкции щековой дробилки является привод. Существующие варианты электрического привода были частично рассмотрены ранее (п. 1), а его недостатки кратко могут быть сведены к следующим:

- создание в процессе работы неуравновешенных колебаний и вибраций, что нарушает санитарные нормы вибраций, шума и пыли;

- наличие сложных редукторов и эксцентриковых валов, требующих больших маховиков и тяжелых подшипников;

- сложность или невозможность регулирования показателей дробления (сил, частоты колебаний, производительности и пр.);

- высокая стоимость, громоздкость и сложность конструкции, большие габаритные размеры и масса.

Поэтому более перспективным выглядит альтернативный вариант привода — объемный гидравлический. Это обусловлено его преимуществами: большая пере-

даваемая мощность на единицу массы привода (в 3–5 раз больше, чем у электропривода); способность развивать очень большое усилие при компактных размерах, его плавное регулирование; допустимое большое удаление от насосной станции (до 200–300 м), безотказность при перегрузках.

Схема дробилки с гидроприводом и новым исполнительным органом приведена на рисунке 7.

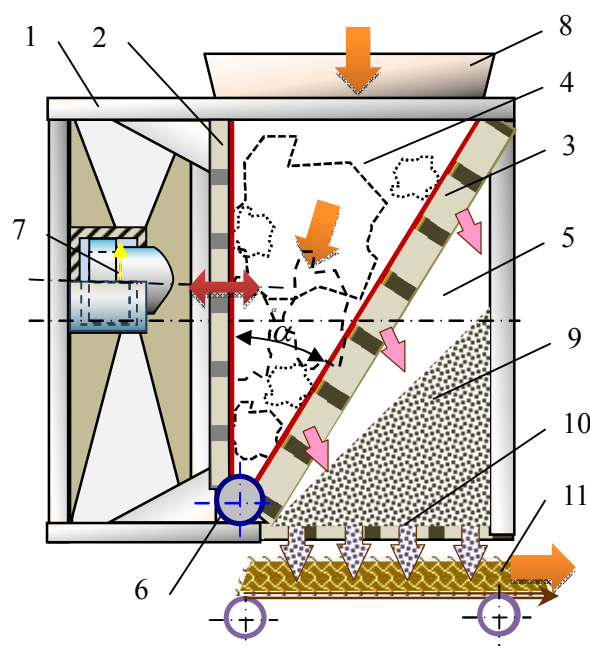


Рисунок 7 — Схема ударной щековой дробилки с гидроприводом и дробящими плитами колосниковой конструкции

Щековая дробилка состоит из сварного или литого корпуса 1, внутри которого располагаются щеки дробилки в виде колосниковых дробящих плит: ударной 2 и выпускной 3, между которыми расположена камера дробления 4, а под выпускной плитой — камера выпуска 5. Дробящая плита 2 может совершать простые круговые качания вокруг шарнира 6.

Привод дробилки представляет собой насосную станцию с объемным гидронасосом (не показаны), к которому гидромагистралями подсоединен и объемный ударный гидроцилиндр УГЦ двойного действия 7, упирающийся своей задней крыш-

кой в корпус 1, а штоком — в дробящую колосниковую плиту 2. Расположение УГЦ 7 по высоте ударной колосниковой плиты 2 соответствует участку приложения к ней равнодействующих сил при дроблении, т. е. около 2/3 длины плиты 2 от шарнира 6.

Над камерой дробления предусмотрен приемный бункер 8, куда конвейером подают материал для дробления, где он, после дробления в камере 4, попадает через колосниковые проемы выпускной плиты 3 в камеру выпуска 5 и в виде готового продукта 9 там скапливается, чтобы потом через выпускные отверстия 10 выгрузиться на конвейер 11.

Как видим, новая дробилка по своей структурной схеме напоминает исходную конструкцию дробилки ЩДП (рис. 3): одностороннее расположение привода, подобные формы камеры дробления, одинаковые загрузка и выгрузка дробимого материала.

Однако имеются и принципиальные различия в сравниваемых конструкциях новой дробилки и ее аналога, что позволяет получить ряд существенных преимуществ:

- новый исполнительный орган в виде колосниковых дробящих плит 2 и 3 с ударными клиньями обеспечивает быструю выгрузку готового продукта через свои проемы, исключает переизмельчение готового продукта в камере дробления, увеличивает производительность дробления, которая теперь не зависит от ширины выпускной щели;

- благодаря иной конструктивной схеме и гидроприводу, в дробилке исключены (рис. 3) маховик 6, эксцентриковый вал 7 со сложными и дорогими подшипниками, шатун 8, винт 9 для подъема клина 10, нажимные плиты 12, тяги 13 и другие элементы, что намного упрощает конструктивную компоновку дробилки в целом;

- новая компоновка дробилки, которая стала возможной из-за отказа от выпускной щели, резко облегчила замыкание силовых и кинематических цепочек в конструкции, обеспечив их высокую надежность и безотказность; позволила поднять

частоту ударного воздействия на материал за пределы вредного воздействия на человека (более 10–15 Гц);

- появилась новая выпускная камера, где перед выгрузкой накапливается готовый продукт дробления; существенно увеличен угол захвата α между дробящими плитами, что заметно улучшило массово-габаритные параметры дробилки;

- ввиду высокого запаса на износ колосниковых дробящих плит срок межремонтной работы увеличен в разы (в 4–5 раз), что снижает эксплуатационные затраты при дроблении.

Несмотря на улучшение технико-экономических показателей разработанной конструкции дробилки по сравнению с существующими аналогами, в ней остаются некоторые ранее упомянутые при обзоре недостатки. Главный из них — дробилка осталась динамически неуравновешенной, и при ее работе неизбежно возникнут значительные вибрации и ударные колебания, что потребует усиления корпуса и станины, массивного фундамента и удорожания монтажа.

Вторым недостатком являются существенные отличия в работе колосниковых дробящих плит (ударной 2 и выпускной 3), что вызовет их отличия в конструкции, изготовлении, монтаже и препятствует взаимозаменяемости.

Основной причиной этих недостатков является синдром инерции мышления, когда неосознанно следуют устоявшимся шаблонам технических решений, в частности, при конструировании ДИМ.

Поэтому при дальнейшем улучшении конструкции необходимо добиться устранения оставшихся недочетов, что потребует перехода на симметричную конструктивную схему дробилки, представленную на рисунке 8.

В корпусе 1 новой щековой дробилки размещены симметрично активные дробящие плиты 2 (по старой терминологии «щеки»), которые над собой формируют камеру дробления 3 с углом захвата α , а

под собой — симметричные камеры выпуска 4. Дробящие плиты 2 могут совершать вращательные колебания вокруг общего шарнирного вала 5. Приводом для дробящих плит 2 служит объемный двигатель в виде двух встречно направленных зеркально расположенных ударных гидроцилиндров 6 двойного действия (УГЦ), штоки которых шарнирно соединены с дробящими плитами 2, а днища связаны между собой каркасными тягами 7.

Исходный материал поступает в приемный бункер 8, расположенный над камерой дробления 3, и подвергается ударному воздействию исполнительного органа в виде встречно сходящихся колосниковых дробящих плит 2. Под действием ударных клиньев куски материала дробятся расколом, т. е. наименее энергоемким способом. Сразу с верхнего уровня и далее по мере своего измельчения и опускания в камере дробления куски материала с размером меньше заданного, проходя через колосниковые полости в дробящих плитах 2, попадают в камеры выпуска 4 и в виде готового продукта 9 удаляются выходным конвейером 10.

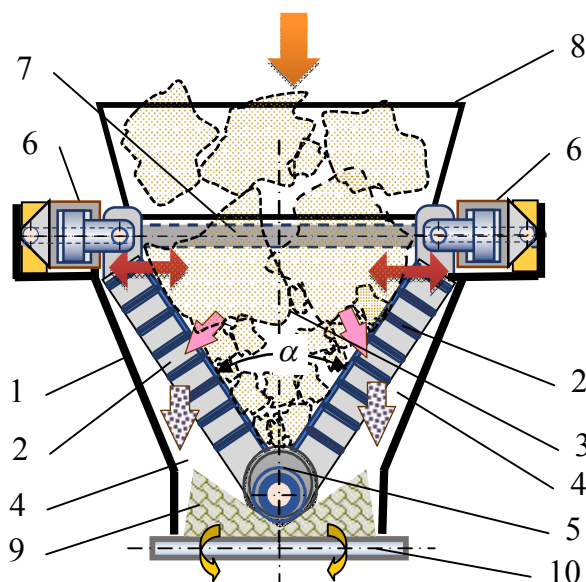


Рисунок 8 — Новая конструктивная схема симметричной ударной щековой дробилки с гидроприводом и дробящими плитами колосниковой конструкции

Камера дробления — как пространство между плитами дробилки, в котором происходит дробление и перемещение материала, — по объему, из соображений увеличения производительности, должна быть по возможности больше по отношению к размерам дробилки. В щековой дробилке объем камеры задается параметрическим углом захвата между дробящими плитами α . Он является одним из главных параметров, определяющих форму и объем камеры дробления.

Для обычных дробилок угол захвата должен быть таким, чтобы при нажатии дробящих плит дробимый камень не был выдавлен из камеры дробления вверх. Поскольку выдавливанию сопротивляются силы трения между кусками и плитами (весом материала в камере можно пренебречь), которые зависят от коэффициента трения f камня по металлу, угол захвата жестко ограничен углом трения φ :

$$\alpha \leq 2 \cdot \arctg f = 2\varphi. \quad (1)$$

Это ограничение на угол захвата, значительно снижающее производительность дробилки, в новых дробилках может быть безболезненно снято ввиду того, что дробление производится за счет кратковременного ударного воздействия и опасность выдавливания кусков вверх минимальна.

В соответствии с морфологической системой классификации, которая охватывает наибольшее число технологических и конструктивных признаков по 29-ти смысловым делителям, гидропривод дробилки может использоваться в двух вариантах:

- как гидропресс при скорости нагружения материала дробящими плитами меньше 1...2 м/с;

- как гидроударный молот при скоростях нагружения, превышающих 2...4 м/с.

Выбор способа нагружения должен производиться с учетом конкретных условий дробления для получения высоких технико-экономических показателей. Поэтому так важно наметить методику их обоснованного расчета.

6 К расчету основных параметров новой щековой дробилки

Вопросы теории расчета ударного разрушения материалов представляют собой сложную и до настоящего времени до конца не решенную проблему. В основу таких расчетов положены классические представления об изменении скоростей двух тел при их мгновенном динамическом взаимодействии.

Удар рассматривается как процесс, при котором за очень малое время порядка $10^{-3} \dots 10^{-5}$ с происходит скачкообразное изменение скоростей тела и действуют очень большие мгновенные силы, создающие на площадке контакта значительные давления до $10^2 \dots 10^4$ МПа.

Однако при ударном разрушении реальных материалов необходимо учитывать многочисленные дополнительные факторы, которыми ранее пренебрегали. К ним, в частности, относятся смятие контактной поверхности, разрушение одного из тел, прочностные и деформационные параметры тел в запрелдельном состоянии, волновые процессы, случайный разброс начальных и граничных условий удара и др. Отсюда становится понятна большая сложность поставленной задачи, что заставляет на данном этапе ограничиться лишь достаточно грубыми инженерными оценками и приближениями.

Предварительно задаемся основными конструктивными исходными параметрами дробилки согласно [4]:

– максимальный возможный размер кусков, загружаемых в дробилку, D_{\max} ;

– расстояние между дробящими плитами в верхней части камеры дробления, принимаем с учетом симметрии и наличия двух встречных дробящих плит $B \geq 2D_{\max} / 0,85 = 2,4D_{\max}$;

– с учетом удвоенной ширины дробящей камеры и ее симметричности длина приемного отверстия $L = 0,5B = 1,2D_{\max}$;

– амплитуду хода поршня УГЦ обычно задают в пределах $s = 30 \dots 50$ мм, что поз-

воляет считать движение дробящих плит не круговым, а линейным;

– принимаем кратность дробления с учетом более эффективной работы колосниковых дробящих плит:

$$i = D_{\max} / d_{\max} = 10 \dots 20, \quad (2)$$

где d_{\max} — максимальный размер куска после дробления, мм.

Опираясь на известную задачу Г. Герца о напряженном состоянии плоского диска под действием встречно направленных по диаметру сосредоточенных сил, определяем требуемое усилие, прикладываемое дробящей плитой для раскола куска материала:

$$F_P = \frac{2}{\pi} \sigma_P A_P k_n, \text{ Н}, \quad (3)$$

где F_P — усилие на поршне УГЦ, Н;

σ_P — прочность материала на ударный раскол, Па;

A_P — площадь расколов кусков, подвергнутых одновременному удару, м^2 ;

k_n — коэффициент, учитывающий число одновременных точек контактов дробящей плиты с материалом, $1 \leq k_n \leq 4$.

В общем случае число точек контакта может быть и больше четырех. Если разрушение происходит путем сжатия (щековая обычная, конусная, валковая и маятниковая дробилки, шаровая и стержневая мельницы), оно всегда равно или больше двух. В ударных и молотковых конструкциях дробилок, где используют инерционные свойства материала, одновременно возникает только одна точка контакта.

Диаметр поршня УГЦ при заданном давлении p в гидросистеме

$$d_{Ц} = \sqrt{\frac{4F_P}{\pi p}}, \text{ м}. \quad (4)$$

Зная массу дробящей плиты $m_{П}$ и усилие F_P , к ней приложенное, находим ускорение $a_{П}$, с которым она разгоняется,

и ускорение a_H ее движения в обратном направлении (как правило $a_{II} \approx 2a_H$):

$$\begin{aligned} a_{II} &= F_P / m_{II}; \\ a_H &= F_H / m_{II}; \end{aligned} \quad \text{м/с}^2, \quad (5)$$

где $F_H = p \cdot A_H$ — сила, приложенная к тыльной стороне поршня УГЦ, Н;

A_H — площадь тыльной стороны поршня УГЦ, м².

Задаваясь ходом поршня УГЦ в пределах, рекомендуемых для щековых дробилок ($s = 30 \dots 50$ мм), и приравнивая энергию УГЦ $W_{II} = m_{II} \cdot [v_{II}]^2 / 2$ и работу разрушения силы F_P на участке ее контакта при внедрении на глубину Δ_P в материал $W_F = F_P \cdot \Delta_P / 2$, можно найти необходимую для раскола минимальную скорость плиты дробления:

$$[v_{II}] = \sqrt{F_P \Delta_P / m_{II}}, \quad \text{м/с}. \quad (6)$$

Значит, для разрушения ударным расколом необходимо выполнить условие движения дробящей плиты со скоростью не менее $v_{II} \geq [v_{II}]$.

Находим время разгона (ускорения) дробящей плиты под действием УГЦ:

$$t_Y = [v_{II}] / a_{II}, \quad \text{с}. \quad (7)$$

За время разгона перед ударным расколом дробящая плита преодолеет расстояние

$$s_Y = a_{II} \cdot (t_Y)^2 / 2, \quad \text{м}. \quad (8)$$

Время обратного хода УГЦ с учетом меньшей его площади рассчитывается таким же порядком и будет увеличено примерно в 3...4 раза.

Максимально возможное число ударов дробящих плиты при ее движении за один ход (цикл) на расстояние s

$$n_Y = s / s_Y. \quad (9)$$

Рассмотрим более подробно поведение материала в рабочей камере дробилки, по-

лагая, что весь ее объем полностью заполнен. Решение находим исходя из теорем об изменении количества движения и кинетического момента системы при ударе и полагая, что удар дробящей плиты по материалу является прямым и центральным, а движение материала, представляющего собой многошарнирную сыпучую среду, при смещении плит s возможно лишь вверх на не более чем $0 \leq h_M \leq s \cdot \sin(\alpha / 2)$. Поскольку горизонтальная компонента скорости отсутствует, получим с учетом (6) для вертикальной компоненты скорости в зависимости от сжимаемости среды

$$0 \leq v_M \leq v_{II} \sin(\alpha / 2), \quad \text{м/с}. \quad (10)$$

Однако такой сценарий дробления не всегда бывает оптимальным, поскольку нет необходимости продолжать движение дробящей плиты после осуществления раскола вплоть до исчерпания рабочего хода. Возможен вариант удара, после которого УГЦ может закончить ударный цикл и начать движение в исходное положение, возвращая плиту назад и позволяя поднятому вверх материалу упасть вниз под действием собственного веса.

Тогда высота подъема материала в камере дробления будет определяться величиной его вертикальной скорости (10)

$$h_M = v_{II}^2 / 2g = v_{II}^2 \sin^2(\alpha / 2) / 2g, \quad \text{м}, \quad (11)$$

а продолжительность цикла подъема и опускания материала после ударного раскола равна

$$t_M = 2v_M / g = 2v_{II} \sin(\alpha / 2) / g, \quad \text{с}. \quad (12)$$

Можно принять продолжительность цикла дробления равной периоду подъема и опускания материала в дробилке.

При смещении дробящих плит вниз постоянно происходит выход из камеры дробления кусков материала, меньших d_{\max} , поэтому, с учетом самосинхронизации колебательных процессов в дробилке, возникает встречное движение падающего

материала и дробящей плиты, что повышает эффективность дробления.

Рассмотрим ударное воздействие дробящей плиты на куски в камере дробления. Зная ускорение a_{II} дробящей плиты под воздействием поршня УГЦ (5), найдем время t_X ее движения за весь рабочий ход УГЦ:

$$t_X = \sqrt{2s / a_{II}}, \text{ с.} \quad (13)$$

Находим скорость дробящей плиты в конце рабочего хода s :

$$v_{\max} = a_{II} t_X, \text{ м/с.} \quad (14)$$

Кинетическая энергия плиты $\mathcal{E} = m_{II} v_X^2 / 2$ будет равна работе силы ударного раскола $A_Y = F_Y \cdot \Delta / 2$ на создание неупругих смещений $\Delta = 3 \dots 5$ мм в точке ударного контакта (работой на перемещение кусков в камере дробления пренебрегаем ввиду ее малости). Тогда ударная сила раскола равна

$$F_Y = m v_{\max}^2 / \Delta, \text{ Н.} \quad (15)$$

Нетрудно убедиться, что всегда $F_Y \gg F_P$, т. е. ударное разрушение намного эффективнее статического раскола.

Повторно по зависимости (10–12), но уже для максимально возможной скорости дробящей плиты v_{\max} , определяем максимальные значения:

– вертикальной компоненты скорости подъема материала в камере дробления:

$$v_{M \max} = v_{\max} \sin(\alpha / 2), \text{ м/с;}$$

– высоты подъема материала над уровнем загрузки в камере дробления:

$$h_{M \max} = v_{\max}^2 \sin^2(\alpha / 2) / 2g, \text{ м;}$$

– продолжительности подъема и падения материала после удара дробящей плиты: $t_{M \max} = 2v_{M \max} / g, \text{ м.}$

Очевидно, что продолжительность цикла воздействия ударной плиты на материал должна находиться в пределах

$$t_M \leq t_{II} \leq t_{M \max}, \text{ с.} \quad (16)$$

Чем меньше время цикла t_{II} работы УГЦ, тем меньшее усилие раскола от УГЦ, тем выше производительность дробилки. Выбор режима работы дробилки будет зависеть от критериев и приоритетов эксплуатации (энергоёмкость дробления, производительность, надежность работы и пр.).

Варьируя рабочее давление в УГЦ, можно изменять продолжительность цикла его работы t_{II} и частоту ударов $1/t_{II}$, ориентируясь на то, чтобы исключить диапазон наиболее опасной для здоровья человека частоты $1/t_{II} = 7 \dots 10$ Гц. Наиболее приемлемой следует считать частоту ударов 15–20 Гц.

Цикл работы дробилки начинается с движения УГЦ назад из начального положения, равного половине хода поршня s_Y , с максимальным отрицательным ускорением $-a_H$. Происходит своеобразный «отскок» дробящих плит в стороны и вниз от кусков в камере дробления, которые как бы «зависают» и под действием собственного веса стремятся сдвинуться вниз. Однако ввиду $|a_H| \gg g$ их падение не происходит.

Достигнув крайнего положения, после переключения давления шток УГЦ начинает с ускорением двигать дробящие плиты в направлении камеры дробления. Набрав необходимую кинетическую энергию $\mathcal{E}_{II} = m_{II} [v_{II}]^2 / 2$, дробящие плиты производят ударный раскол, совершая работу разрушения $W_F = F_P \cdot \Delta_P / 2$, поле чего они двигаются с ускорением в обратном направлении, завершая рабочий цикл. Графики изменения ускорений, скоростей и пути движения поршня УГЦ во времени показаны на рисунке 9.

Определившись с параметрами дробилки, можно оценить **параметры гидропривода**:

– рабочий объем УГЦ:

$$V_{II} = s \cdot \pi (d_{II})^2 / 4, \text{ м}^3; \quad (17)$$

– расход рабочей жидкости за цикл:

$$Q_{\Gamma} = V_{\Pi} \cdot t_{\Pi}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (18)$$

– требуемая мощность гидронасоса с учетом его КПД η :

$$P_{\Gamma} = Q_{\Gamma} \cdot p / \eta, \text{ кВт}; \quad (19)$$

– энергия удара УГЦ:

$$\mathcal{E}_y = m_{\Pi} \cdot (v_{\max})^2 / 2, \text{ кДж}. \quad (20)$$

Для определения производительности дробилки воспользуемся приближенной инженерной ее оценкой по известной удельной энергоемкости дробления материалов ударным расколом, равной $\mathcal{E}_y = 0,2 \dots 0,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$.

Отсюда производительность дробилки

$$P_{\text{д}} = P_{\Gamma} / \mathcal{E}_y, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (21)$$

Следует принять во внимание, что предлагаемая методика расчета не претендует на завершенность и полную достоверность, она нуждается в дальнейшем развитии и углублении на базе не только теоретических обоснований и инженерных приближений, но и, главным образом, с учетом реальных условий и опыта эксплуатации дробилки нового типа.

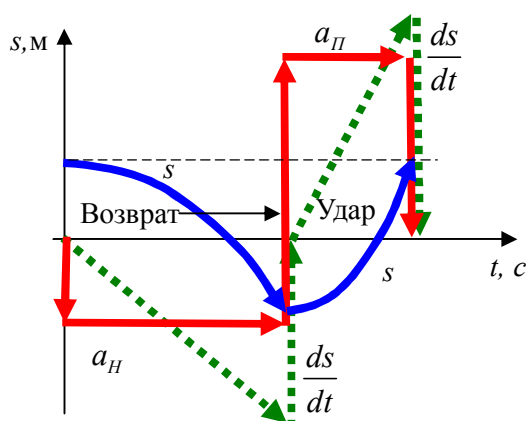


Рисунок 9 — Кинематика движения УГЦ в ударной щековой дробилке за один цикл

7 Пример расчета параметров новой дробилки

За исходные данные принимаем:

- размеры исходного и конечного куска $D_{\max} = 500 \text{ мм}; d_{\max} = 50 \text{ мм};$
- кратность дробления $i = 500/50 = 10;$
- размер камеры дробления в плане с учетом рекомендаций [3] при автоматической загрузке $B \times L \times H = 1,2 \times 0,6 \times 1,0 \text{ м}$ где $H = 1 \text{ м}$ — глубина камеры дробления;
- ход поршня УГЦ $s = 40 \text{ мм};$
- угол захвата $\alpha = 60^\circ;$
- размеры дробящей плиты $B_{\partial} \times L_{\partial} \times H_{\partial} = 1,2 \times 0,6 \times 0,3 = V_{\partial} = 0,22 \text{ м}^3;$
- масса дробящей колосниковой плиты с учетом пустотности $k_K = 0,7, m_{\Pi} = \gamma \cdot V_{\partial} \cdot k_K = 7800 \cdot 0,22 \cdot 0,7 \approx 1200 \text{ кг};$
- ход качания верхних концов дробящих плит $S_{\partial} = 40 \text{ мм};$

– прочность дробимого материала типа гранита, габбро, базальта на раскол в образце составляет $\sigma_p^{обп} \approx 3 \text{ МПа}$, а с учетом масштабного фактора для куска D_{\max} получим при переходе от образца сечением $0,05 \times 0,05 \text{ м}$ к исходному куску $0,5 \times 0,5 \text{ м}$ прочность на раскол $\sigma_p \approx 0,7 \cdot \sigma_p^{обп} \approx 2 \text{ МПа}$.

Задаваясь площадью вероятного раскола кубических кусков размером $0,5 \text{ м}$ $A_p = 2A_K = 2 \cdot 0,5^2 = 0,5 \text{ м}^2$, а также коэффициентом числа одновременных контактов $k_n = 2$, определяем необходимое статическое усилие раскола: $F_p = \frac{2}{\pi} 3 \cdot 0,5 \cdot 2 = 1,9 \text{ МН}$.

Принимая рабочее давление в УГЦ $p = 16 \text{ МПа}$ и задаваясь диаметром поршня УГЦ $d_{\Pi} = 0,2 \text{ м}$, определим усилие, оказываемое УГЦ на дробящую плиту: $F_C = 16 \cdot \pi (0,2)^2 / 4 = 0,5 \text{ МН} \ll F_y$.

Скорость дробящей плиты, необходимая для выполнения раскола (6): $[v_{\Pi}] = \sqrt{5 \cdot 10^5 \cdot 0,003 / 1200} = 1,12 \text{ м/с}$.

Найдем ускорение ударной плиты (5) под действием F_Y :

$$a_{II} = 5 \cdot 10^5 \text{ Н} / 1200 \text{ кг} = 416 \text{ м/с}^2.$$

Время разгона (ускорения) дробящей плиты под действием силы F_Y от УГЦ:

$$t_Y = [v_{II}] / a_{II} = 1,12 / 416 = 0,00084 \text{ с}.$$

Время возвратного хода УГЦ двойного действия равно

$$t_B = 2t_Y = 2 \cdot 0,00084 = 0,0017 \text{ с}.$$

Полное время цикла работы УГЦ не менее $t_{II} = t_Y + t_B \geq 0,00084 + 0,0017 = 0,0025 \text{ с}$; принимаем время цикла $t_{II} = 0,08 \text{ с}$.

Дробящая плита преодолеет расстояние согласно (8)

$$s_Y = 416 \cdot 0,00085^2 / 2 = 0,015 \text{ м} < s = 0,04 \text{ м}.$$

Согласно (10) найдем горизонтальную компоненту скорости плиты:

$$v_M = 1,12 \sin(60 / 2) = 0,66 \text{ м/с}.$$

Под действием УГЦ и удара плиты материал поднимется на высоту (11)

$$h_M = 0,66 / 2g = 0,033 \text{ м}.$$

Полный цикл подъема и опускания материала над уровнем загрузки камеры дробления согласно (12)

$$t_M = 2 \cdot 0,66 / g = 0,134 \text{ с}.$$

Определяем параметры гидропривода дробилки согласно (17–21):

– рабочий объем УГЦ прямого и обратного хода поршня ($1 + 0,5 = 1,5$)

$$V_{II} = 1,5 \cdot 0,04 \cdot \pi (0,2)^2 / 4 = 1,8 \text{ л};$$

– расход рабочей жидкости, если задать время цикла $t_{II} = 0,08 \text{ с}$

$$Q_G = 1,8 / 0,08 = 22 \text{ л/с} = 0,022 \text{ м}^3/\text{с};$$

– мощность гидронасоса

$$P_G = 0,022 \cdot 16000 / 0,95 = 335 \text{ кВт};$$

– энергия удара дробящей плиты

$$\mathcal{E}_Y = 1200 \cdot (3,53)^2 / 2 = 7,5 \text{ кДж};$$

– ожидаемая производительность дробилки в пределах

$$P_D = 335 / (0,3 \dots 0,4) = 840 \dots 1100 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Детальный расчет гидропривода дробилки и обоснование его конструктивных параметров (гидроаккумулятор, распределительная, управляющая и предохранительная арматура, управление тепловыми потоками и пр.) требуют отдельного исследования и будут отражены в дальнейших публикациях.

Выводы

Технический уровень наиболее распространенного, благодаря своим достоинствам, типа дробилок — щековых — может быть значительно повышен за счет устранения присущих им технических противоречий. Выявленные у существующих конструкций щековых дробилок недостатки позволили сформулировать главные требования к ним и основные пути их устранения.

Исследования были направлены на переход к наименее энергоемкому способу дробления материалов — ударному расколу — за счет перехода к гидроприводу и новой колосниковой конструкции дробящей плиты.

Разработанный принципиально новый исполнительный орган дробилки в виде колосниковых дробящих плит, вооруженных ортогональными ударными клиньями, между которыми предусмотрены конусообразные проемы, обеспечил качественно иную последовательность дробления ударным расколом и выход готового продукта.

Новая методика расчета предложенной конструкции дробилки впервые оценивает не только кинематические, но и динамические параметры взаимодействия колосни-

ковой дробящей плиты с витающим дробимым материалом.

Кардинальные изменения конструктивного исполнения и особенностей работы новой щековой дробилки позволили устранить большинство присущих этому типу ДИМ недостатков. В частности: перейти к дроблению способом ударного раскола, резко снизить неуравновешенность главного вектора и момента действующих усилий, обеспечить беспрепятственный выход готового продукта сразу из всего объема камеры дробления, увеличить кратность дробления

и минимизировать переизмельчение, значительно (в разы) продлить срок службы дробилки и межремонтные сроки, повысить производительность и существенно снизить габаритно-массовые ее показатели.

Предварительно полученные оценки технико-экономических параметров новой ударной щековой дробилки с колосниковыми дробильными плитами существенно превышают достигнутые показатели у существующих дробилок, что делает перспективным ее широкое промышленное внедрение.

Библиографический список

1. Alban J. Lynch, Chester A. Rowland. *The History of Grinding*. Littleton, Colorado : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2005. 209 pp.
2. *Нанотехнологии. Азбука для всех / под ред. Ю. Д. Третьякова*. М. : Физматлит, 2007. 235 с.
3. Клушанцев Б. В., Косарев А. И., Муїземнек Ю. А. *Дробилки. Конструкция. Расчет. Особенности эксплуатации*. М. : Машиностроение, 1990. 320 с.
4. Бауман В. А., Клушанцев Б. В., Мартынов В. Д. *Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций*. М. : Машиностроение, 1981. 327 с.
5. Сиденко П. М. *Измельчение в химической промышленности*. 2-е изд., перераб. М. : Химия, 1977. 368 с.
6. Сапожников М. Я. *Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций*. М. : Высшая школа, 1971. 382 с.
7. Силенок С. Г. *Механическое оборудование предприятий строительной индустрии*. М. : Стройиздат, 1973. 375 с.
8. *Строительные машины : справочник*. Т. 1 / под ред. В. А. Баумана и Ф. А. Лапира. М. : Машиностроение, 1976. 502 с.
9. *Строительные машины: справочник*. Т. 2 / под ред. В. А. Баумана и Ф. А. Лапира. М. : Машиностроение, 1977. 496 с.
10. ГОСТ 27412-93. *Дробилки щековые. Общие технические условия*. Минск, 1997. 17 с.
11. *Труды Европейского симпозиума по измельчению во Франкфурте-на-Майне, апрель 1962*. М. : Стройиздат, 1966. 301 с.
12. Блохин В. С. *Основные параметры технологических машин*. М. : Машиностроение, 2006. 404 с.
13. Нестеров А. П., Зиновьев С. Н., Евсюкова Л. В. *Исследование процесса дробления щековыми дробилками с гидроприводом // Механика жидкости и газа: материалы междунар. науч.-техн. конф. Донецк : ДонНТУ, 2010. 193 с.*
14. Левченко Э. П., Тумин А. Н., Онищенко Н. Э. *Особенности применения гидропривода в щековых дробилках // Сб. науч. тр. ДонГТУ. Алчевск : ДонГТУ, 2017. Вып. 48. С. 81–85.*
15. Литвинский Г. Г. *Основы теории резания и разрушения горных пород // Сб. науч. тр. ДонГТУ. Алчевск : ДонГТУ, 2017. Вып. 51. С. 5–15.*
16. Литвинский Г. Г. *Аналитическая теория прочности горных пород и массивов*. Донецк : Норд-Пресс, 2008. 207 с.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ГЭМиО ДонГТУ Корнеевым С. В., к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ А. М. Зинченко

Статья поступила в редакцию 01.06.2023.

Prof. Litvinsky G. G. (*Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation*)
HYDRAULICALLY OPERATED JAW IMPACT CRUSHER (PROBLEMS AND SOLUTIONS)

A brief background analysis of the development of technique and technology of materials crushing was carried out. Technical contradictions have been revealed and the shortcomings of crushing and grinding machines (CGM) have not yet been overcome. Forward-looking approaches to overcoming technical contradictions have been identified and a set of requirements derived from the analysis of the work of existing CGMs has been formulated. The invention relates to a new design for the most common type of CGM — a hydraulic impact crusher. A completely new structural element of the new jaw crusher is a grade crushing plate with impact wedges, forming an orthogonal grid with openings throughout the area. The article considers and justifies the modernized impact jaw crusher, in which the principle of constructive symmetry and force balance is realized. The article studies peculiarities of work of impact crusher with hydraulic drive and develops methods of calculation of its parameters.

Key words: *jaw crusher, hydraulic actuator, impact splitting, executive unit, flake crushing plates, dynamic fracture force, technical contradictions, impact wedges, parameter calculation, kinematics and crushing dynamics, service life, productivity, structural and technological parameters, techno-economic advantages.*

References

1. Alban J. Lynch, Chester A. Rowland. *The History of Grinding*. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2005. 209 p.
2. *Nanotechnology ABC. Book for Everyone [Nanotekhnologii. Azbuka dlya vseh]*. M.: Fizmatlit, 2007. 235 p. (rus)
3. Kluishntsev B. V., Kosarev A. I., Muizemnek Yu. A. *Crushers. Design. Calculation. Features of operation. [Drobilki. Konstrukciya. Raschet. Osobennosti ekspluatacii]*. M.: Mechanical Engineering, 1990. 320 p. (rus)
4. Bauman V. A., Kluishntsev B. V., Martynov V. D. *Mechanical equipment of enterprises of building materials, products and structures [Mekhanicheskoe oborudovanie predpriyatij stroitel'nyh materialov, izdelij i konstrukcij]*. M.: Mechanical Engineering, 1981. 327 p. (rus)
5. Sidenko P. M. *Grinding in the chemical industry. 2nd ed., rework [Izmel'chenie v himicheskoy promyshlennosti. 2-e izd., pererab.]*. M.: Himiya, 1977. 368 p. (rus)
6. Sapozhnikov M. Ya. *Mechanical equipment of enterprises of building materials, products and structures [Mekhanicheskoe oborudovanie predpriyatij stroitel'nyh materialov, izdelij i konstrukcij]*. M.: Vysshaya shkola, 1971. 382 p. (rus)
7. Silenok S. G. *Mechanical equipment for construction industry enterprises [Mekhanicheskoe oborudovanie predpriyatij stroitel'noj industrii]*. M.: Strojizdat, 1973. 375 p. (rus)
8. *Construction machines. Textbook. Vol. I. Eds. Bauman V. A. and Lapira F. A. [Stroitel'nye mashiny. Spravochnik. T. I. Pod red. Baumana V. A. i Lapira F. A.]*. M.: Mechanical Engineering, 1976. 502 p. (rus).
9. *Construction machines. Textbook. Vol. II. Eds. Bauman V. A. and Lapira F. A. [Stroitel'nye mashiny. Spravochnik. T. II. Pod red. Baumana V. A. i Lapira F. A.]*. M.: Mechanical Engineering, 1977. 496 p. (rus)
10. GOST 27412-93. *Jaw crushers. General specifications [GOST 27412-93. Drobilki shchekovye obshchie. Tekhnicheskie usloviya]*. Minsk, 1997. 17 p. (rus)
11. *Proceedings of the European symposium on grinding in Frankfurt am Main [Trudy Evropejskogo simpoziuma po izmel'cheniyu vo Frankfurte-na-Majne]*. M.: Strojizdat, 1966. 301 p. (rus)
12. Blokhin V. S. *Main parameters of technological machines [Osnovnye parametry tekhnologicheskikh mashin]*. M.: Mechanical Engineering, 2006. 404 p. (rus)
13. Nesterov A. P., Zinov'ev S. N., Evsiukova L. V. *Study of the crushing process with hydraulically driven jaw crushers [Issledovanie processa drobleniya shchekovymi drobilkami s gidroprivodom]*. *Mekhanika Zhidkosti i Gaza: materialy mezhd. nauch.-tekhn. konferencii DonNTU. Donetsk, 2010. 193 p. (rus)*

14. Levchenko E. P., Tumin A. N., Onishchenko N. E. Features of application in jaw crushers [Osobennosti primeneniya v shchekovyh drobilkah]. Scientific works collection of DonSTU. 2017. Iss. 48. Pp. 81–85. (rus)

15. Litvinskiy G. G. Fundamentals of the theory of cutting and destruction of rocks [Osnovy teorii rezaniya i razrusheniya gornyh porod]. Scientific works collection of DonSTU. 2017. Iss. 51. Pp. 5–15. (rus)

16. Litvinskiy G. G. Analytical theory of strength of rocks and massifs [Analiticheskaya teoriya prochnosti gornyh porod i massivov]. Donetsk: Nord-Press, 2008. 207 p. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Литвинский Гарри Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. строительных геотехнологий

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ,

e-mail: ligag@ua.ru

УДК 621.793.71

Харламов Ю. А., Петров П. А., Изюмов Ю. В., Орлов А. А.
Донбасский государственный технический университет

ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Статья посвящена систематизации и сравнительному анализу конструктивных особенностей и схем детонационных камер сгорания с переменным сечением, используемых в установках для детонационно-газового напыления покрытий и других видов обработки, преимущественно дисперсных материалов, их систематизации и поиску путей их совершенствования. Импульсные (детонационные) камеры сгорания (ДКС) являются важнейшим блоком детонационно-газовых установок и предназначены для циклического сжигания горючих смесей газов и создания импульсных высокоскоростных потоков продуктов детонации и их взаимодействия с частицами порошка напыляемого материала с формированием напылительных гетерогенных струй. ДКС с переменным сечением обладают комплексом технологических преимуществ и, прежде всего, реализацией горения в режиме пересжатой детонации, повышением скорости и температуры напыляемых частиц и улучшением свойств получаемых покрытий. Рассмотрены четыре основные группы ДКС с переменным сечением: с переменными площадью и размерами поперечного сечения по длине; с переменными формой, площадью и размерами поперечного сечения по длине; с переменными положениями осей поперечного сечения по длине (закрученные ДКС); с плавным изменением формы, площади и размеров поперечного сечения по длине. Приведены примеры таких ДКС, преимущества и недостатки.

Ключевые слова: детонационные камеры сгорания, продукты детонации, детонационные волны, профилированные камеры, газовые смеси, напыляемые частицы.

Введение. Высокая энергетическая эффективность детонационного горения обусловила интенсивный поиск его практического применения [1, 2], в том числе для напыления покрытий. Детонационно-газовое напыление явилось первым практическим применением газовой детонации, а также первым высокоскоростным методом газотермического напыления (ГТНП), обеспечившим резкое улучшение свойств газотермических покрытий (ГТП). Разработано в конце 1950-х в США, а в 1970-е годы самостоятельно развивалось в СССР и странах СНГ [3–5]. Детонационно-газовые установки (ДГУ) представляют собой довольно сложные технические системы. Основной подсистемой ДГУ, оказывающей определяющее влияние на процесс напыления, является импульсная (детонационная) камера сгорания (ДКС), где организуется регулярное импульсное (пульсирующее) сжигание газовой смеси, нагрев и ускорение частиц порошка, формирующих напы-

лительную струю. Преимущественная доля исследований газовой детонации проведена для условий протекания в прямых каналах и трубах, поэтому ДКС ДГУ на начальном этапе их развития применяли в виде прямых каналов, причем при использовании для напыления легко детонирующих газовых смесей. Дальнейшее развитие технологии детонационно-газового напыления покрытий (ДГНП) требует расширения номенклатуры напыляемых материалов, не исключена возможность перехода на дешевые, но трудно детонирующие газовые смеси. Это обуславливает целесообразность анализа и поиска новых конструктивных схем ДКС, прежде всего для улучшения условий формирования покрытий с требуемыми свойствами, создания композиционных и других видов покрытий нетрадиционного строения, структуры и свойств. Анализ основных схем ДКС приведен в работах [6–8]. Быстрое развитие теории детонационного горения и практики его приме-

нения существенно расширяет возможности разработки конструкций ДКС, более полно отвечающих технологическим требованиям получения высококачественных покрытий. Для увеличения параметров продуктов детонации (ПД) перспективно применение пересжатых детонационных волн (ДВ). Даже небольшое увеличение скорости ДВ приводит к резкому росту таких параметров продуктов детонации (ПД), как давление, плотность, массовая скорость. Пересжатые ДВ могут быть генераторами импульсных потоков ПД с параметрами, заметно превышающими те, которые можно получить при самоподдерживающемся режиме детонации Чепмена-Жуге (ЧЖ) [8]. При переходе детонации из широкой трубы в узкую детонация может усиливаться и распространяться в пересжатом режиме. Пересжатые ДВ конструктивно просто получать путем уменьшения поперечного сечения трубы. Одним из таких перспективных направлений является разработка ДКС переменного сечения.

Целью данной статьи являются систематизация и сравнительный анализ конструктивных особенностей и схем детонационных камер сгорания с переменным сечением, используемых в установках для детонационно-газового напыления покрытий и других видов обработки, их систематизация и поиск путей их совершенствования.

Основные результаты исследования. По конструктивным особенностям различают детонационные камеры сгорания (ДКС): прямые, изогнутые, разветвляющиеся, прямые с обоими открытыми торцами, петлеобразные, U-образные, многокамерные с общей камерой зажигания, кольцевые, спиральные, многосекционные и др.; находят также применение ДКС с переменным поперечным сечением [6–8]. Нами выделены четыре группы таких ДКС:

1) ДКС с переменными площадью и размерами поперечного сечения по длине;

2) ДКС с переменными формой, площадью и размерами поперечного сечения по длине;

3) ДКС с переменными положениями осей поперечного сечения по длине (закрученные ДКС);

4) ДКС с плавным изменением формы, площади и размеров поперечного сечения по длине.

Детонационные камеры сгорания с переменными площадью и размерами поперечного сечения по длине. На начальном этапе развития ДГНП применяли ДКС, которые в литературе по ГТНП именуют термином «стволы», с постоянным поперечным сечением диаметром 20...25 мм и длиной 1,0...2,0 м (рис. 1, *a*). Источники инициирования горения обычно располагаются вблизи закрытого торца ДКС или сопряженных с ним камер зажигания. Применяют также различные схемы ввода напыляемого порошка в разгонную часть как со стороны закрытого торца (осевая подача), так и поперечную непосредственно в зону разгона. Различают стволы с постоянным по длине поперечным сечением, изменяющейся по длине площадью поперечного сечения (резко или плавно), изменяющейся по длине формой поперечного сечения, а также формой и площадью поперечного сечения. Одной из таких конструкций, описанной в а. с. СССР № 513728, является ступенчатый ствол, состоящий из двух цилиндрических ступеней разного диаметра (рис. 1, *b*), расположенных в порядке уменьшения поперечного сечения (ПС) по направлению истечения продуктов детонации. По мнению авторов, за счет возникновения отраженных волн на переходе ступеней увеличивается удельная энергия потока продуктов детонации. При входе в ступень с наименьшим диаметром d отраженная от торцевой стенки ДВ движется навстречу потоку ПД, оставляя за своим фронтом ПД с более высокими параметрами, чем до отражения. При четырехкратном уменьшении площади поперечного сечения и использовании смеси ацетилена с кислородом в соотношении 1:1 увеличиваются параметры ПД в выходной секции до давления 6,8 МН/м² и температуры около 5150 К. Увеличивается также скорость ПД и время пребывания в

них частиц порошка. Однако увеличение диаметра D входной секции увеличивает преддетонационное расстояние, или необходимо использовать более мощные источники инициирования горения.

Аналогичная схема ДКС использована в а. с. СССР № 1827872. Для увеличения длительности истечения ПД и пребывания в них частиц порошка увеличивается длина ступеней ДКС, для лучших условий истечения ПД ступени могут сопрягаться кони-

ческим переходником (рис. 1, с). При увеличении D уменьшаются удельные (на единицу массы) потери энергии ПД на трение и теплоотвод в стенки ствола. С другой стороны, с уменьшением отношения d/D увеличиваются потери энергии ПД за счет интенсификации пульсационных процессов в камере сгорания, возникающих при последовательном отражении газового потока от стенок конически сужающегося патруб-ка и закрытого торца ствола [9].

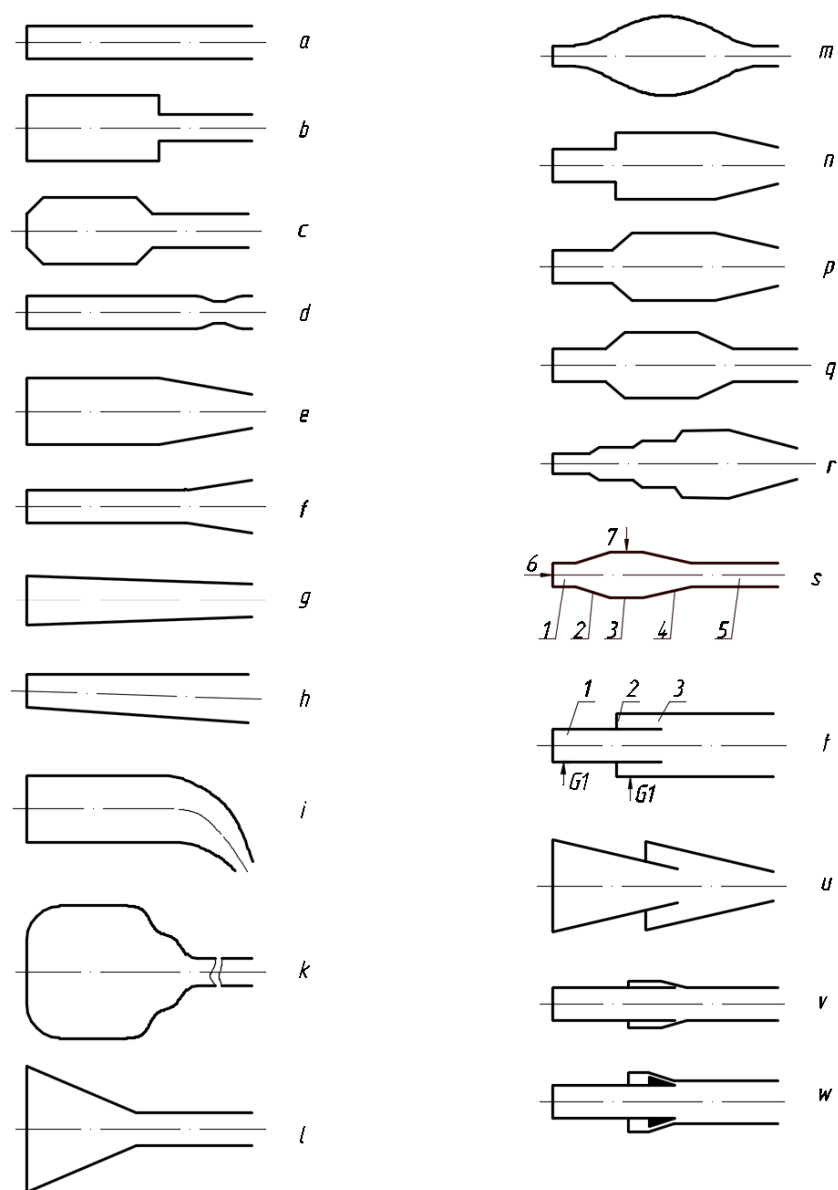


Рисунок 1 — Детонационные камеры сгорания с переменной площадью и размерами поперечного сечения по длине

В доступных работах первым использованием ДКС с переменным по длине сечением явилась ДГУ по а. с. СССР № 513728, ствол которой выполнялся с сужением поперечного сечения в зоне подачи порошка. По мнению авторов патента СССР № 551053, при изменении расхода порошка длина преддетонационного участка также изменяется, что затрудняет поддержание необходимых значений скорости и температуры напыляемых частиц. Поэтому в упомянутой выше работе предложено снабжать ДКС автоматическим устройством изменения проходного сечения в месте сужения (рис. 1, *d*), связанным с регулятором расхода порошка. Сочетание этих устройств позволяет поддерживать неизменной величину преддетонационного участка. Устройство изменения проходного сечения расположено вблизи открытого торца ДКС и выполнено в виде сопла Лавалья. Применение сопел Лавалья на выходе ДКС для напыления покрытий предусмотрено также в патентах [10, 11]. Использование сопел на выходе ДКС особенно перспективно при ДГН с частичным заполнением ГС или ее переменным составом по длине ДКС. Могут применяться как сужающиеся (рис. 1, *e*), так и расширяющиеся сопла (рис. 1, *f*). Сужающиеся сопла позволяют ускорять потоки продуктов детонации с взвешенными в них частицами порошка с дозвуковой скоростью. Расширяющееся сопло позволяет ускорять такие потоки, которые уже достигают сверхзвуковой скорости на входе в него. Сопла Лавалья позволяют разгонять ПД с частицами порошка от дозвуковых до сверхзвуковых скоростей. Они ускоряются до 1 Маха в сужающейся части сопла, а затем ускоряются до скорости более 1 Маха в расширяющейся части.

В [12] проведено исследование ускорения частиц порошкового материала продуктами газовой детонации в стволе детонационной установки с конической дульной частью, выполнены эксперименты по ускорению частиц порошка WC/Co с углами дульной части 0, 1 и 2 градуса. Обна-

ружено, что коническое уширение позволяет существенно увеличить скорость частиц на вылете из ствола за счет относительно небольшого (в пределах 2°) расширения дульной части: можно добиться существенного (более 20 %) увеличения скорости дисперсных частиц в стволе детонационной установки.

В ДКС по а. с. СССР № 513728 увеличивается удельная энергия потока ПД, однако при этом велики потери энергии при его истечении, связанные с наличием резкого перепада сечений. В [10, 11,], а также в а. с. СССР № 655109 для увеличения удельной энергии потока ПД предложено выполнять ДКС с плавно уменьшающимся к открытому торцу проходным сечением. Одним из вариантов является выполнение ДКС в виде полого усеченного конуса (рис. 1, *g*). Такая же форма ДКС используется в а. с. СССР № 1383583. При большом диаметре закрытого торца ДКС снабжается несколькими воспламенителями ГС. Одновременное поджигание ГС несколькими воспламенителями способствует ускорению ПД и сокращению преддетонационного расстояния. Такие ДКС могут также выполняться с выходными соплами или цилиндрическими выходными патрубками, которые могут выполнять роль разгонных участков порошка.

Конические ДКС могут выполняться расширяющимися в направлении открытого торца (рис. 1, *h*).

ДКС по патенту РФ № 2350403 для напыления внутренних поверхностей имеет выходной (разгонный) участок, образованный изгибом по радиусу вплоть до прямого угла с конусным сужением в конце (рис. 1, *i*), причем ДКС и разгонная часть расположены внутри напыляемой детали, а соотношение диаметров конуса разгонной части составляет от $1/3$ до $1/4$. Практическое применение данной конструкции еще более ограничено трудностями поворота потока напыляемых частиц и коротким участком разгона выходной части ствола. Подобные схемы ДГНП перспективны не столько для напыления внутренних поверхностей, сколько для труд-

нодоступных с целью размещения ствола под прямым углом поверхностей. Угол поворота может быть существенно увеличен, вплоть до нормального, при подаче порошка непосредственно в насадок и при достаточной длине разгонного участка.

В работе [5] со ссылкой на патент США № 3846084 1974 г. описана ДКС в виде луковидной ёмкости, из которой ПД истекают через короткий ствол-сопло (рис. 1, *k*). Такая схема ДКС позволяет увеличить время истечения ПД и, тем самым, длительность пребывания в них частиц порошка и степень их нагрева и ускорения. Однако в такой ДКС затруднено инициирование детонационного горения. Кроме того, сложнее обеспечить равномерное заполнение рабочего объема горючей смесью однородного состава.

В патентах [10, 11] (рис. 1, *l*) ёмкость выполнена в виде полого конуса, резко сужающегося в направлении сопряженного с ним цилиндрического разгонного участка. Эта схема ДКС также позволяет увеличить время истечения ПД и, тем самым, длительность пребывания в них частиц порошка и степень их нагрева и ускорения. Однако также затруднительно обеспечить равномерное заполнение рабочего объема горючей смесью однородного состава и инициирование детонационного горения.

Использование ДКС с большими размерами поперечного сечения у закрытого торца, как уже указывалось, затрудняет газообмен и ПГД. Поэтому целесообразно располагать участки с увеличенными размерами поперечного сечения в средней части ДКС. Рациональной представляется схема ДКС, предложенная в патентах [10, 11], с входным участком у закрытого торца с существенно меньшими размерами поперечного сечения (рис. 1, *m*). Средняя часть ДКС может быть выполнена плавно расширяющейся от входного участка до максимального значения с последующим сужением до выходного участка или среза ДКС. Уменьшение сечения входного участка способствует ускорению ПГД.

Примером такой ДКС является предложенная в а. с. СССР № 702584 схема с двумя цилиндрическими ступенями с увеличением диаметра по направлению к открытому торцу и выходным коническим участком (рис. 1, *n*). Для улучшения процессов газообмена и заполнения свежей ГС цилиндрические ступени можно сопрягать плавным переходом, в данном случае коническим (рис. 1, *p*).

В работе [13] экспериментально изучено распространение детонации в каналах переменного сечения как в покоящейся, предварительно перемешанной смеси метана с кислородом, так и при отдельной подаче метана и кислорода в частотном режиме при нормальных условиях. Начальный диаметр составлял 36 мм, выходной — 21 мм, угол схождения конуса равнялся 8°. При отдельной подаче газов детонация оказалась более стабильной и имела более широкие пределы существования. При этом давление в пересжатой детонационной волне оказалось вдвое выше давления волны Чепмена — Жуге. Размер детонационных ячеек составлял для различных смесей от 4 до 8 мм.

По патентам [10, 11] ДКС может быть выполнена состоящей из трех цилиндрических ступеней разного диаметра, одна из которых (с наибольшим диаметром) располагается в средней части и сопрягается с другими ступенями меньшего диаметра коническими переходами (рис. 1, *q*). При этом в качестве разгонного участка используется выходная цилиндрическая ступень.

Подобная схема, предложенная в патенте на полезную модель РФ № 147755, используется в горелках для сжигания газообразного топлива в детонационном режиме.

По патентам [10, 11] ДКС может быть выполнена из нескольких цилиндрических ступеней с увеличением диаметра по направлению от закрытого торца, сопряженных коническими переходами, с последующим переходом к сужающемуся выходному участку (рис. 1, *r*).

По патенту РФ № 2201293 ДКС имеет последовательно расположенные по направлению от закрытого торца к выходному: цилиндрическую ступень 1, выполняющую роль секции воспламенения; расширяющуюся ступень 2; промежуточную цилиндрическую ступень 3; сужающуюся ступень 4 и цилиндрическую разгонную ступень 5 (рис. 1, s). ДКС имеет инициирующий элемент 6 и источник искрового зажигания 7. Последний предназначен для воспламенения ГС до тех пор, пока температура инициирующего элемента не станет достаточной для воспламенения ГС. ДКС предназначена для работы с высокой скорострельностью до 100...300 Гц (при непрерывной подаче газов). Для создания повышенного давления в процессе горения рекомендуется выдерживать определенные соотношения геометрических параметров ступеней 1, 2, 3 и 4. Угол наклона относительно оси ДКС образующей конуса 4-й ступени рекомендуется в диапазоне $\beta = 8...35^\circ$, а 2-й секции — $\beta = 15^\circ$ (30...75°).

В а. с. СССР № 769853 для расширения технологических возможностей детонационно-газового напыления предложены ДКС, выполненные с двумя секциями (входной 1 с закрытым торцом и выходной 2 с открытым торцом), заполняемые горючими смесями различного состава. Предложено несколько вариантов ДКС. Наиболее простая и технологичная схема (рис. 1, t) состоит из двух цилиндрических ступеней. Выходная ступень большего диаметра охватывает на части длины входную ступень и в зоне их сопряжения образуется кольцевая полость 3, через которую в выходную секцию подаются рабочие газы, в т. ч. ГС G2, в отличие от ГС G1, подаваемой в ступень 1. Обе секции могут быть выполнены с уменьшающимися поперечными сечениями в направлении среза ДКС, например, коническими (рис. 1, u). Возможно также выполнение обеих ступеней с одинаковым диаметром (рис. 1, v). Полость 3 подачи ГС G2 может сообщаться с полостью выходной ступени 2 сужающейся

конической щелью 4 (рис. 1, w). Во всех рассмотренных вариантах могут также использоваться различные выходные сопла.

Детонационные камеры сгорания с переменными формой, площадью и размерами поперечного сечения по длине обеспечивают более широкие технологические возможности для напыления покрытий (возможность заполнения ГС переменного состава, получение единичных пятен с оптимальной геометрией для формирования покрытий, обеспечение оптимальных условий нагрева и ускорения частиц порошка и физико-химических превращений в них и пр.). Так, по а. с. СССР № 803211 ДКС выполнена сужающейся по направлению к открытому концу поперечным сечением. В приведенном примере она выполнена конической на входном участке с переходом на выходной цилиндрический разгонный участок (рис. 2, a). Причем данная ДКС предусматривает вертикальную компоновку с открытым концом внизу, а во входном коническом участке устанавливается порошковый питатель, имеющий коническую форму. При этом между стенками ДКС и порошкового питателя образуется кольцевой зазор, сужающийся в направлении разгонного участка (с уменьшением как размеров, так и площади кольцевого зазора). Такая схема позволяет обеспечить подогрев порошка перед его подачей в разгонный участок. Подача горючей смеси и инициирование её горения проводятся со стороны закрытого торца достаточно большого диаметра, а в кольцевом зазоре ускоряется ПГД.

В то же время обеспечивается достаточно большой объем ПД и длительности их истечения. Вместо порошкового питателя во входном коническом участке могут устанавливаться и другие конструктивные элементы, а ДКС может применяться в различном пространственном положении.

По а. с. СССР № 769853 один из вариантов двухступенчатой ДКС, имеющей две цилиндрические ступени — входную 1 и выходную 2, снабжен двухходовым запор-

ным клапаном 3, а входная цилиндрическая ступень на входном торце и в зоне ее сопряжения с выходной разгонной ступенью выполнена с посадочными гнездами для сёдел клапана 4 (рис. 2, *b*). Входная ступень 1 заполняется горючей смесью *G1* через кольцевую полость 5 при правом положении запорного клапана 3, а горючая смесь состава *G2* подается в выходную ступень 2. После заполнения ступеней горючими смесями запорный клапан 3 перемещается влево и открывает кольцевую щель 6, соединяющую ступени. Порошок вводится в выходную ступень 2, заполненную более благоприятной ГС для напыляемого порошка. В сечении А–А поперечное

сечение первой ступени ДКС имеет кольцеобразную форму площадью

$$F_1 = \frac{\pi \cdot (D_1^2 - d_1^2)}{4};$$

в сечении В–В (кольцевая щель) — также кольцеобразную форму, но с меньшей площадью:

$$F_{II} = \frac{\pi \cdot (D_{II}^2 - d_{II}^2)}{4};$$

в сечении С–С — форму круга:

$$F_2 = \frac{\pi D_2^2}{4}.$$

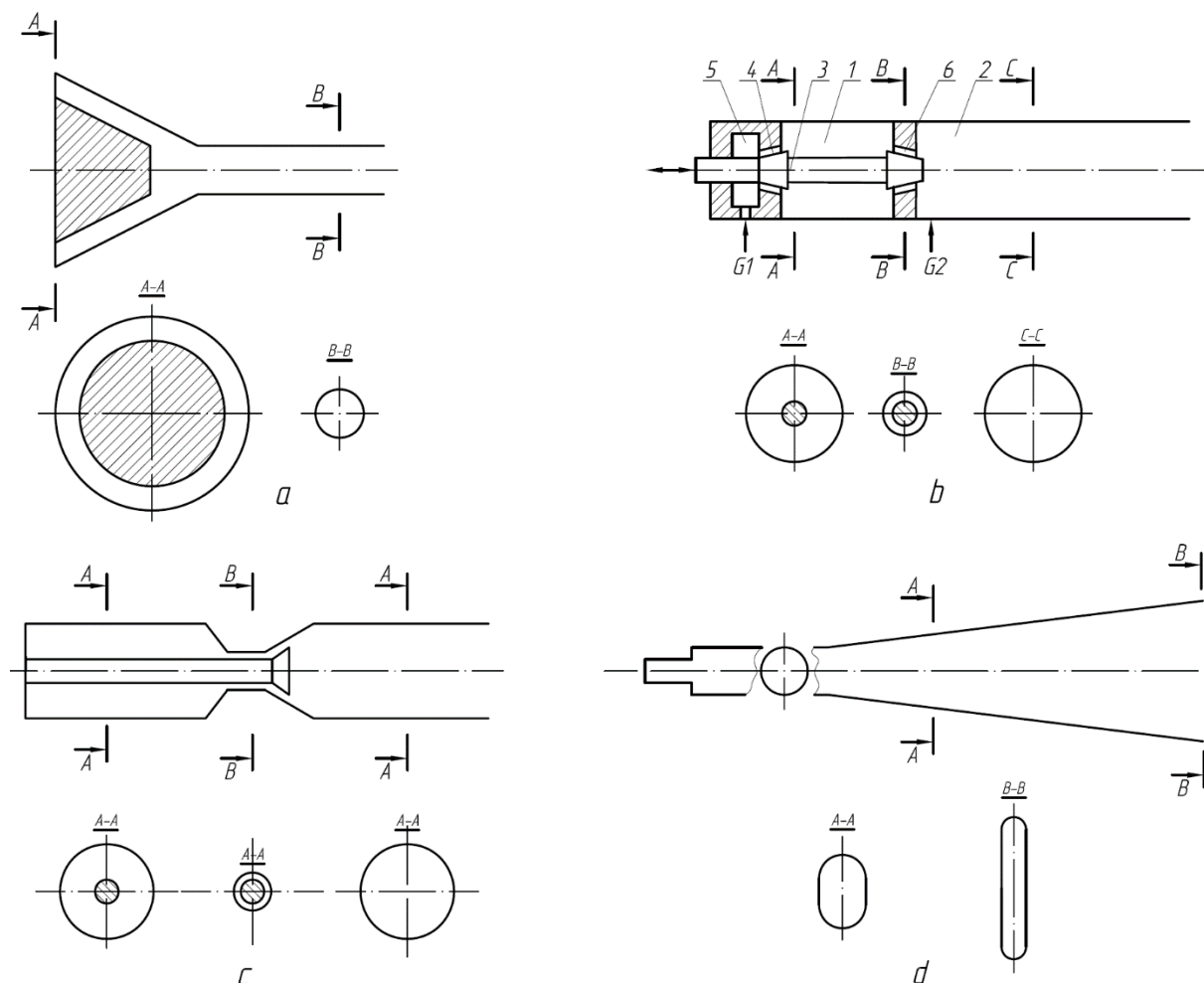


Рисунок 2 — Детонационные камеры сгорания с переменными формой, площадью и размерами поперечного сечения по длине

Причем $d_1 < D_1$; $d_1 < d_n < D_n$. Здесь D_1 и D_2 — наибольшие диаметры ступеней; D_n — наибольший диаметр кольцевой щели, соединяющей ступени; d_1 — диаметр стержня клапана; d_n — наименьший диаметр кольцевой щели, соединяющей ступени. Таким образом, поперечное сечение по направлению от закрытого к открытому торцу ДКС имеет кольцеобразную форму с площадью F_1 , изменяется на переходном участке к кольцеобразной форме с постоянно уменьшающейся площадью, а затем — к форме круга выходного участка.

Возможна более простая схема двухступенчатой ДКС с центральным телом (рис. 2, с), в которой происходят следующие изменения поперечного сечения (ПС) по длине: постоянное кольцеобразное сечение первой ступени — плавное уменьшение ПС до постоянного кольцеобразного на участке перехода ко второй ступени — плавное увеличение ПС до постоянного в форме круга выходной ступени.

По [10, 11], а также в а. с. СССР № 790427 ДКС выполняют с плавно изменяющейся формой ПС с переходом от осесимметричной к симметричной относительно одной из осевых плоскостей форме (рис. 2, d). В плоскости симметрии размер ПС выбран увеличивающимся по направлению к открытому торцу, а в перпендикулярной ей плоскости — уменьшающимся. Например, выходную часть ДКС выполняют плавно изменяющейся от цилиндрической к форме ПС, имеющей две плоские параллельные стенки, сопряженные между собой для образования замкнутого контура ПС неосесимметричной формы. Выходная часть ДКС может быть дополнена выходным соплом с постоянным по его длине ПС. Наличие плавного изменения ПС способствует дополнительной турбулизации потока газозвеси порошка, более равномерному нагреву и ускорению.

Детонационные камеры сгорания с переменными положениями осей поперечного сечения по длине (закрученные ДКС) представляют интерес для нанесения покрытий с использованием закрутки импульсных напылительных потоков. Предполагается,

что их применение позволит управлять распределением концентрации напыляемых частиц в потоках, формированием неоднородных распределений плотности, температуры и давления газа по сечению потока, увеличением тепло- и массообмена, перераспределением поля скоростей по сравнению с незакрученными течениями, сепарацией частиц порошка в поле центробежных сил, образованием в приосевой области обратных течений в сильно закрученных потоках, предоставит дополнительные возможности для получения необходимой формы пятна напыления и пр. Уже известны положительные результаты влияния закручивания потока на нанесение покрытий холодным газодинамическим напылением непрерывными высокоскоростными струями [14].

В а. с. СССР № 1572147 предложено ДКС выполнять на всей или части длины с неосесимметричным ПС, сужающимся к выходному торцу с плавным изменением положения осей этого ПС. ДКС может быть выполнена, например, с овальным ПС, причем большая ось овального сечения вблизи закрытого торца расположена вертикально, а по мере приближения к выходному торцу ее положение плавно изменяется поворотом вокруг продольной оси ДКС, вплоть до горизонтального положения (рис. 3). Закручивание рабочей полости ДКС приводит к дополнительной турбулизации газового потока, его ускорению, сокращению ПГД. ДКС может быть выполнена с разнообразным неосесимметричным ПС, например, прямоугольным, квадратным и пр.

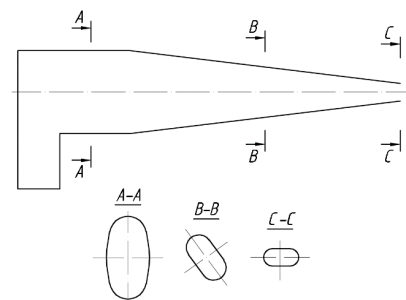


Рисунок 3 — Детонационные камеры сгорания с переменными положениями осей поперечного сечения по длине (закрученные ДКС)

Детонационные камеры сгорания с плавным изменением формы, площади и размеров поперечного сечения по длине позволяют не только расширить технологические возможности ДГНП, присущие рассмотренным выше группам ДКС, но и получать нетрадиционные формы единичных пятен напылённых покрытий.

Например, для нанесения покрытий на кольцевые поверхности небольших размеров возможно использование ДКС с кольцевым поперечным сечением. Однако в случае кольцевой полости сгорания увеличиваются потери энергии потока ПД вследствие увеличения площади ограничивающих стенок почти в 2 раза:

$$S = \frac{\pi L \cdot (D^2 - d^2)}{4}.$$

В машиностроении защитные покрытия часто наносят на кольцевые поверхности таких деталей массового и серийного производства, как тарельчатые клапаны и седла ДВС, запорных и регулирующих клапанов и другой трубопроводной арматуры, торцовые уплотнения и др. Для этих целей перспективно использование ДКС, выполненных с плавно изменяющейся формой поперечного сечения с переходом от осесимметричной к неосесимметричной форме, реализованных в а. с. СССР № 1728582. При таком конструктивном исполнении устройства достигается преобразование импульсного гетерогенного потока, имеющего круглое поперечное сечение, в поток с формой поперечного сечения в виде кольцевого сектора, совпадающего по размерам с обрабатываемой кольцевой поверхностью, например, на которую наносится покрытие.

Ширина кольцевого слоя покрытия, приблизительно равная ширине кольцевого поперечного сечения выходного торца ствола, соответствует ширине упрочняемой кольцевой поверхности. Это исключает энергетические и материальные затраты на нанесение покрытий по причине полного перекрытия единичного пятна напыления

обрабатываемой поверхностью. Одновременно достигается высокая производительность процесса и улучшаются условия формирования покрытий. Последнее прежде всего связано с обеспечением более высокой скорости охлаждения единичного слоя. При использовании конических (или цилиндрических) стволов при равной производительности резко возрастает толщина единичного слоя покрытия, что снижает скорость охлаждения и интенсифицирует процессы разложения (диссоциации) материала покрытия. Кроме того, при переходе к кольцевой форме поперечного сечения уменьшается поперечное сечение ствола, что формирует пересжатые детонационные волны и способствует более эффективному энергообмену между потоком продуктов сгорания и частицами порошка.

ДКС может быть выполнена цилиндрической с преобразованием круглой формы поперечного сечения на всей или части длины в форму кольцевого сектора (рис. 4, а). При таком конструктивном исполнении достигается не только преобразование формы поперечного сечения гетерогенного потока, но и уменьшение площади его поперечного сечения и, тем самым, повышение его параметров за счет реализации режима пересжатой детонации. Наружный диаметр ствола (цилиндрический участок) соответствует наружному диаметру кольцевого участка поверхности, на который наносится покрытие. Данный вариант устройства наиболее целесообразен для применения при обработке кольцевых поверхностей относительно небольшого диаметра. Напыляемый порошок фокусируется в кольцевой сектор, что исключает его излишние затраты, а также бесполезное расходование энергии за счет приведения к геометрическому соответствию формы и размеров поперечного сечения гетерогенного потока и обрабатываемой поверхности.

ДКС может быть выполнена также на всей или части длины в форме конфузора, расширяющегося в направлении открытого торца, с преобразованием круглой формы поперечно-

го сечения на всей или части длины в форму кольцевого сектора (рис. 4, *b*). При таком конструктивном исполнении устройства обеспечивается возможность обработки кольцевых поверхностей, диаметр которых превышает размеры начального участка ствола, примыкающего к закрытому торцу. Этот вариант применяется для напыления кольцевых поверхностей с наружным диаметром свыше 40 мм.

ДКС может быть на всей или части длины выполнена конической, сужающейся в направлении открытого торца, с преобразованием круглой формы поперечного сечения на всей или части длины в форму

кольцевого сектора (рис. 4, *c*). При таком конструктивном исполнении обеспечивается возможность обработки кольцевых поверхностей небольшого диаметра, а также более высокая степень пересечения детонационной волны, ведущая к улучшению качества наносимого слоя.

При использовании ДКС этого типа уменьшение площади внутренних стенок ДКС снижает теплоотвод потока ПД. Упрощается конструкция ДКС и её обслуживание при эксплуатации ДГУ. Расход рабочих газов по предварительным оценкам снижается на 3...8 %, а порошка — на 15...40 %.

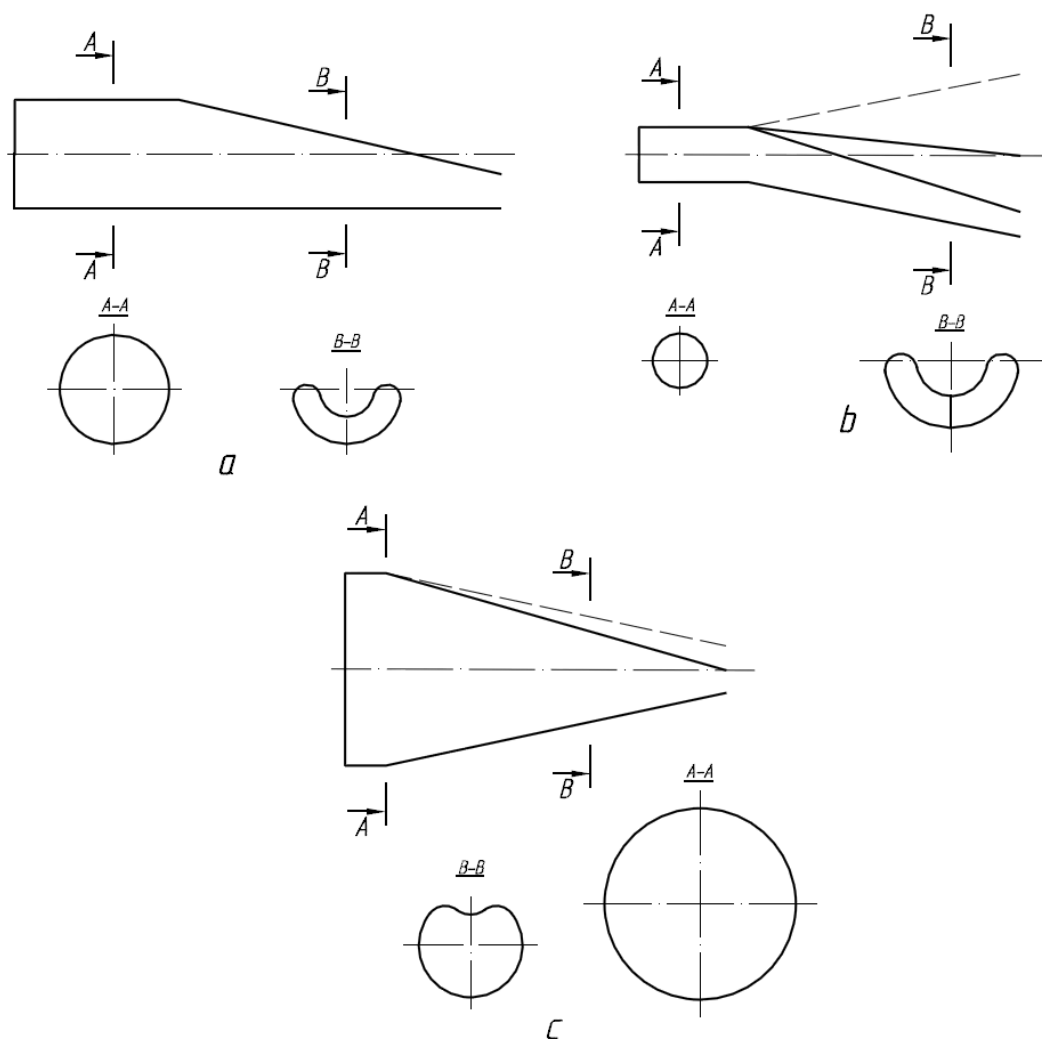


Рисунок 4 — Детонационные камеры сгорания с плавным изменением формы, площади и размеров поперечного сечения по длине

Выводы:

1. Технологические возможности детонационно-газового напыления покрытий с требуемыми свойствами могут быть существенно расширены при использовании профилированных камер детонационного сгорания, причем не только конических, но и с изменением вдоль продольной оси формы, размеров и положения осей поперечного сечения.

2. Возможности изменения поперечного сечения детонационных камер сгорания могут быть использованы для поиска условий получения единичных пятен напыления оптимальной конфигурации с

учетом формы и размеров напыляемых поверхностей.

3. Изменение формы поперечного сечения и закручивание камер сгорания вдоль их продольной оси могут быть использованы для управления параметрами потока продуктов детонации и взаимодействия их с частицами напыляемого порошка.

4. Детонационные камеры сгорания с переменным сечением могут найти реализацию и в других практических применениях газовой детонации: струйно-абразивной обработке, обработке дисперсных материалов, очистке твердых поверхностей и др.

Библиографический список

1. *Детонационно-газовые технологии и устройства: состояние и перспективы развития. Сообщение 3. Применение газовой детонации в обрабатывающих и обслуживающих отраслях экономики / Ю. А. Харламов [и др.] // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. № 27 (70). С. 73–84.*
2. Kharlamov Y. A. *Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective // Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2008. Maastricht : Conference Proceedings, 2008. P. 159–166.*
3. *Применение детонации в газах для нанесения покрытий / Ю. А. Харламов [и др.] // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11. № 1. С. 88–95.*
4. Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А. *Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М. : Наука, 1978. 224 с.*
5. Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А. *Детонационное напыление покрытий. Л. : Судостроение, 1979. 232 с.*
6. Харламов Ю. А. *Стволы установок для детонационного напыления покрытий // Автоматическая сварка. 2001. № 10. С. 17–21.*
7. Харламов Ю. А., Сундарараджан Г., Цяпа А. Н. *Конструктивные особенности детонационных камер сгорания для напыления // Вісник Східноукраїнського національного університету. 2001. № 5 (39). С. 169–178.*
8. Гавриленко Т. П., Прохоров Е. С. *Пересжатая детонационная волна в газе // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17. № 6. С. 121–125.*
9. Батраев И. С., Прохоров Е. С., Ульяницкий В. Ю. *Разгон и нагрев порошковых частиц продуктами газовой детонации в каналах с коническим переходом // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 3. С. 78–86.*
10. *Dispositif de canon pour la projection de revetements par detente de gaz : nat. 81 02856 Франция. № 2499874; опубл. 20.08.1982. 22 с.*
11. *Detonation schichtungs vorrichtung : nat. DE 31 05323 C2 ФРГ. Опубл. 02.09.1982. 9 с.*
12. Батраев И. С., Прохоров Е. С., Ульяницкий В. Ю. *Ускорение дисперсных частиц продуктами газовой детонации в расширяющемся канале // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике : тезисы докладов IX международной конференции. Новосибирск, 2020. С. 197–198.*
13. Бивол Г. Ю., Головастов С. В., Голуб В. В. *Формирование пересжатой волны детонации в потоке метано-кислородных смесей в канале переменного сечения // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. Вып. 4. С. 576–581. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364417030036>*
14. *Управление формой пятна напыления при ХГН. Часть 2. Процесс напыления / В. Н. Зайковский [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 2. С. 233–240.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Вишневским Д. А.,
д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛГУ им. В. Даля Замотой Т. Н.

Статья поступила в редакцию 20.04.2023.

Doctor of Technical Sciences Kharlamov Yu. A., PhD in Engineering Petrov P. A., PhD in Engineering Iziumov Yu. V., Orlov A. A. (Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR, the Russian Federation)

DETONATION-GAS COMBUSTION CHAMBERS OF VARIABLE CROSS-SECTION FOR COATING SPRAYING

The article is devoted to systematization and comparative analysis of design features and schemes of detonation combustion chambers with variable cross-section used in installations for detonation-gas spraying of coatings and other types of processing, mainly dispersed materials, their systematization and search for ways to improve them. Pulsed (detonation) combustion chambers (DCS) are the most important unit of detonation-gas installations and are designed for cyclic combustion of combustible gas mixtures and the creation of pulsed high-speed flows of detonation products and their interaction with powder particles of the sprayed material with the formation of sputtering heterogeneous jets. DCS with a variable cross-section have a set of technological advantages and, above all, the implementation of combustion in the mode of burning detonation, an increase in the speed and temperature of the sprayed particles and an improvement in the properties of the coatings obtained. Four main groups of DCS with variable cross-section are considered: with variable area and dimensions of the cross-section along the length; with variable shape, area and dimensions of the cross-section along the length; with variable positions of the cross-section axes along the length (twisted DCS); with a smooth change in the shape, area and dimensions of the cross-section along the length. Examples of such DCS, advantages and disadvantages are given.

Key words: detonation combustion chambers, detonation products, detonation waves, profiled chambers, gas mixtures, sprayed particles.

References

1. Kharlamov Yu. A. Detonation-gas technologies and devices: state and prospects of development. Report 3. Use of gas detonation in manufacturing and service industries [Detonacionno-gazovye tekhnologii i ustrojstva: sostoianie i perspektivy razvitiya. Soobshchenie 3. Primenenie gazovoi detonacii v obrabatyvayushchikh i obsluzhivayushchikh otrasliakh ekonomiki]. Scientific works collection of DonSTI. 2021. No. 27 (70). Pp. 73–84. (rus)
2. Kharlamov Yu. A. Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective. Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2008. Maastricht, The Netherlands: Conference Proceedings, 2008. Pp. 159–166.
3. Kharlamov Yu. A. Use of detonation in gases for coating [Primenenie detonacii v gazakh dlya naneseniya pokrytij]. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1975. Vol. 11. No 1. Pp. 88–95. (rus)
4. Shorshorov M. Kh. Physical and chemical bases of detonation gas spraying coatings [Fiziko-khimicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napyleniya pokrytij]. M.: Science, 1978. 224 p. (rus)
5. Zverev A. I. Detonation spraying of coatings [Detonacionnoe napylenie pokrytij]. L.: Shipbuilding, 1979. 232 p. (rus)
6. Kharlamov Yu. A. Trunks of installations for detonation spraying of coatings [Stvoly ustanovok dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij]. Automatic Welding. 2001. No. 10. Pp. 17–21. (rus)
7. Kharlamov Yu. A. Design features of detonation combustion chambers for spraying [Konstruktivnye osobennosti detonacionnykh kamer sgoraniya dlya napyleniya]. Bulletin of East-Ukrainian National University. 2001. No. 5 (39). Pp. 169–178. (rus)
8. Gavrilenko T. P. Over-compressed detonation wave of gas [Pereshhataia detonacionnaia volna v gaze]. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1981. Vol. 17. No. 6. Pp. 121–125. (rus)
9. Batraev I. S. Acceleration and heating of powder particles by gas detonation products in channels with conical transition [Razgon i nagrev poroshkovykh chastits produktami gazovoi detonacii v

kanalakh s konicheskim perekhodom]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2014. Vol. 50. No. 3. Pp. 78–86. (rus)

10. Kharlamov Yu. A., Kalenov V. I., Pisklov Yu. L., Ryaboshapko B. L. *Dispositif de canon pour la projection de revetements par detente de gaz*. Patent France 81 02856, no. 2499874, 1982.

11. Kharlamov Yu. A., Kalenov V. I., Pisklov Yu. L., Ryaboshapko B. L. *Detonation schichtungs vorrichtung*. Patent German DE 31 05323 C2. 1982.

12. Batraev I. S. *Particulate acceleration by gas detonation products in expanding channel [Uskoreniye dispersnykh chastits produktami gazovoi detonacii v rasshiryayushchemsya kanale]*. Lavrentyev readings on mathematics, mechanics and physics: Theses of IX International Papers. 2020. Pp. 197–198. (rus)

13. Bivol G. Yu. *Formation of the over-compressed detonation wave in the flow of methane-oxygen mixtures in the variable cross-section channel [Formirovaniye pereshhatoi volny detonacii v potoke metano-kislorodnykh smesey v kanale peremennogo secheniya]*. *High Temperature*. 2017. Vol. 55. Iss. 4. Pp. 576–581. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364417030036> (rus)

14. Zaikovskiy V. N. *Control of Spray Spot Shape at CGS. Part 2. Spraying Process [Upravlenie formoj pyatna napyleniya pri KhGN. Chast' 2. Protsess napyleniya]*. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014. Vol. 21. No. 2. Pp. 233–240. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Изюмов Юрий Викторович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

Орлов Андрей Андреевич, ассистент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, РФ

СОДЕРЖАНИЕ**НАУКИ О ЗЕМЛЕ***Смекалин Е. С., Кулакова С. И., Павлов В. И.*

МЕТОДИКА ШАХТНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ И УГЛЕДОБЫЧИ НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ	5
--	---

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ*Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Кравцова С. И., Пилипенко В. В.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОКАТКИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОЛОСОБУЛЬБОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПО СТУПЕНЧАТОЙ КАЛИБРОВКЕ НА СОВРЕМЕННЫХ СТАНАХ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ КЛЕТЕЙ	13
---	----

Проценко М. Ю., Куберский С. В., Завгородний С. Р., Анашкин А. А.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОЯ МАГНЕЗИТОВЫХ ОГНЕУПОРОВ В СОСТАВЕ ТОРКРЕТ-МАСС	24
---	----

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА*Карапетян С. Х., Емец Е. В., Псюк В. В.*

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ СТОЙКАХ ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЯХ ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ	33
---	----

Будзило Е. Е., Горовая Н. А., Псюк М. Ю.

КОНСТРУИРОВАНИЕ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАНИЗМА ЧЕБЫШЕВА	38
--	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ*Харламов Ю. А., Вишневский Д. А., Петров П. А., Бочаров А. В.*

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПУЛЬСИРУЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫХ УСТРОЙСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	47
--	----

Сотников А. Л., Пасечник С. Ю., Вишневский Д. А., Орлов А. А., Каленская А. В., Муховатый А. А.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ВОЗДУШНЫХ ФУРМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ	58
--	----

Снитко С. А., Вишневский Д. А., Зинченко А. М.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ НАГРУЗОК ДВУХВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ	69
--	----

Литвинский Г. Г.

УДАРНАЯ ЩЕКОВАЯ ДРОБИЛКА С ГИДРОПРИВОДОМ (ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ)	75
---	----

Харламов Ю. А., Петров П. А., Изюмов Ю. В., Орлов А. А.

ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ	94
--	----

CONTENT**GEOSCIENCES***Smekalin E. S., Kulakova S. I., Pavlov V. I.*

METHODOLOGY FOR MINE INSTRUMENTAL STUDIES OF METHANE RELEASE AND COAL MINING PROCESSES AT EXCAVATION SITES	5
--	---

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES*Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., Kravtsova S. I., Pilipenko V. V.*

INVESTIGATION THE POSSIBILITY OF ROLLING ASYMMETRIC BULB FLAT SECTIONS BY THE INTERVAL CALIBRATION ON MODERN MILLS WITH SEQUENTIAL ARRANGEMENT OF STANDS	13
--	----

Protsenko M. Yu., Kuberskiy S. V., Zavgorodniy S. R., Anashkin A. A.

UTILIZATION EFFICIENCY OF BREAKAGE OF MAGNESITE REFRACTORIES IN THE GUNNING BODY COMPOSITION	24
--	----

CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE*Karapetyan S. Kh., Emets E. V., Psiuk V. V.*

STRESS-STRAIN STATE OF CONCRETE IN REINFORCED BEAM COLUMNS UNDER LOW-CYCLE LOADS OF HIGH LEVELS	33
---	----

Budzilo E. E., Gorovaia N. A., Psiuk M. Yu.

DESIGNING NEW EQUIPMENT USING THE CHEBYSHEV MECHANISM	38
---	----

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE*Kharlamov Yu. A., Vishnevskiy D. A., Petrov P. A., Bocharov A. V.*

ORGANIZATION OF THE WORKFLOW OF PULSATING DETONATION-GAS DEVICES FOR TECHNOLOGICAL PURPOSES	47
---	----

Sotnikov A. L., Pasechnik S. Yu., Vishnevskiy D. A., Orlov A. A., Kalenskaia A. V., Mukhovatyi A. A.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF FRICTION STIR WELDING THE AIR TUYERES OF BLAST FURNACES	58
---	----

Snitko S. A., Vishnevskiy D. A., Zinchenko A. M.

INVESTIGATING THE WORKLOADS OF A DOUBLE ROLL GEAR CRUSHER	69
---	----

Litvinsky G. G.

HYDRAULICALLY OPERATED JAW IMPACT CRUSHER (PROBLEMS AND SOLUTIONS) ...	75
--	----

Kharlamov Yu. A., Petrov P. A., Iziumov Yu. V., Orlov A. A.

DETONATION-GAS COMBUSTION CHAMBERS OF VARIABLE CROSS-SECTION FOR COATING SPRAYING	94
---	----

Distribution and replication is forbidden without official allowance of FSEI HE "DonSTU"

**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 31 (74) 2023

**Establisher:
FSEI HE "DonSTU"**

*Certificate of the Ministry of Communications
and Mass Media of the LPR
for mass media registration III 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-ОД
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-ОД*

*Recommended by academic council
of FSEI HE "DonSTU"
(Record № 5 dated 23.06.2023)*

Added to scientometrical database of RSCI

Format 60×84½
Conventional printed sheet 13,5
Order № 114

Circulation 100 copies
Publishing office is not responsible for material
content giving by author for publishing

Address of editorial office, publishing and establishing:
FSEI HE "DonSTU"
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
МИ-СГР ИД 0000055 dated 05.02.2016

Editor-in-chief

Vishnevskiy D. A. — Doctor of Tech. Sc., Asst. Prof.,
Rector

Deputy Editor-in-chief

Smekalin E. S. — PhD in Engineering, Asst. Prof.,
Vice-Rector for Science

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.
Artiukh V. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Asst. Prof.
Snitko S. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Kuberskiy S. V. — PhD in Engineering, Prof.
Dolzhikov V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Denischenko P. N. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Sholukh N. V. — Doctor of Arch., Prof.
Andriychuk N. D. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Pilavov M. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Davidenko A. I. — 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.

© FSEI HE "DonSTU", 2023
© Chernyshova N. V., graphic cover
design, 2023