

**ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**НАУКОЕМКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ И
ОБОРУДОВАНИЕ В
ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

ВЫПУСК 4 (78)

АПЧЕВСК, 2024

**Научноёмкие технологии и оборудование
в промышленности и строительстве**

Научный журнал
Выходит 4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 4 (78) 2024

**Knowledge-intensive technologies and equipment
in industry and building**

Scientific journal
Publishing 4 times a year
Founded in June 1999
Issue 4 (78) 2024

Алчевск
2024

УДК 62 + 669 + 681.51 + 69

EDN: CWDIPG

**Научноёмкие технологии
и оборудование в промышленности
и строительстве**

Научный журнал

Выпуск 4 (78) 2024

**Основатель:
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»**

*Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
ПИ № ФС77-85961 от 11.09.2023*

*Рекомендовано учёным советом
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»
(Протокол № 12 от 28.06.2024)*

*Включён в наукометрическую
базу данных РИНЦ*

Формат 60×84½
Усл. печат. л. 11,9
Заказ № 156
Тираж 500 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
294204
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

Вишневский Д. А. — д.т.н., проф., ректор

Заместитель главного редактора

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

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.
Коршунов Г. И. — д.т.н., проф.
Еременко В. А. — 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.
Витренко В. А. — д.т.н., проф.
Кузин А. В. — д.т.н., доц.
Михайлов А. Н. — д.т.н., проф.
Козлов А. М. — д.т.н., проф.
Зинченко А. М. — к.э.н., доц.
Снитко С. А. — д.т.н., доц.
Корзун Е. Л. — д.т.н., проф.
Богатырева Е. В. — д.т.н., проф.
Яковченко А. В. — д.т.н., проф.
Гончарук А. В. — д.т.н., проф.
Куберский С. В. — к.т.н., проф.
Денищенко П. Н. — к.т.н., проф.
Давиденко А. И. — д.т.н., проф.
Сулейманова Л. А. — д.т.н., проф.
Смоляго Г. А. — д.т.н., проф.
Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.
Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной
коллегии

Для научных сотрудников, аспирантов,
студентов высших учебных заведений.

Язык издания:
русский, английский

Компьютерная вёрстка
Исмаилова Л. М.

© ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2024
© Чернышова Н. В., художественное
оформление обложки, 2024

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

SUBSURFACE MANAGEMENT

УДК 622.28

EDN: YSWGKU

*Литвинский Г. Г.**Донбасский государственный технический университет**E-mail: Ligag@ya.ru*

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ КРЕПИ С РАСПОРНО-ПОДАТЛИВОЙ ТРУБОБЕТОННОЙ СТОЙКОЙ

Приведен ретроспективный анализ векторов и временной последовательности развития конструкций крепи горных выработок. Показано, что стальные рамные арочные крепи стали тормозом развития горной технологии и должны быть заменены стоечно-рамными конструкциями. Рассмотрены особенности работы шахтных стоек и сформулированы требования к ним, выполнено сопоставление показателей стоечной и анкерной крепи. Предложены нормированные критерии технической эффективности крепи и даны оценки коэффициентов конструктивного качества крепежных материалов. Показано, что лучшими по своим критериям технической эффективности являются анкера и стойки. Критически рассмотрены существующие конструкции стоек и выявлены их основные недостатки. Разработаны новые конструкции узлов податливости и предварительного распора стоек на основе использования гидроцилиндров для создания соответствующих усилий в конструкции. Новым в узле податливости является радиальное равномерное обжатие трубобетонной стойки, создаваемое в соосной со стойкой обойме с использованием трибоматериала с высоким коэффициентом трения. Узел предварительного распора крепи выполнен в виде нижней опоры стойки, где размещен цилиндр распора с вакуумной резиной. Определены основные параметры новой конструкции стойки и приведен пример ее расчета. Показано, что распорно-податливая стойка может стать основой для разработки шахтной стоечно-рамной крепи нового технического уровня.

Ключевые слова: шахтная крепь, рамная крепь, шахтная стойка, анкер, нормированные критерии технического уровня, крепежные материалы, конструкция шахтной стойки, узел податливости, узел предварительного распора, трубобетон, расчет стойки.

1 Актуальность проблемы и цель исследований

Одним из основных производственных процессов при подземном строительстве и добыче твердых полезных ископаемых подземным способом следует по праву считать крепление горных выработок, которое оказывается самым трудо- и материалоемким. С усложнением горно-геологических условий, что связано с неизбежным увеличением глубины ведения работ и истощением легкодоступных месторождений сырьевых ресурсов, наблюдается постоянная тенденция повышения трудовых и материальных затрат на крепление [1–6], где показано, что они прошли длительный и разветвленный путь развития от простейших деревянных стоек до сложных комбинированных рамных и сплошных конструкций

из разных материалов, главным образом из стали, бетона и железобетона [4, 6].

Крепи горных выработок постоянно совершенствовались, изменялись их конструкции и основные материалы.

Доступные природные материалы (дерево, камень), начиная с конца 19-го и начала 20-го веков, стали постепенно замещаться металлическим прокатом, бетоном и железобетоном, которые, наряду со значительным увеличением грузонесущей способности крепи, одновременно привели и возрастанию ее стоимости. Это отражало диалектический закон единства и борьбы противоположностей. Смена номенклатуры крепежных материалов дала толчок к разработке новых конструкций крепи, а достижения в экспериментально-теоретических исследованиях горной геомеханики позволили обосновать и оптимизировать

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

параметры деформационно-силового взаимодействия крепи и массива горных пород.

Как показано в [4, 6], вектор эволюционного развития неоднократно менял свое направление, и в настоящее время можно считать наиболее прогрессивными анкерные и набрызг-бетонные крепи.

Если представить исторические этапы развития горной крепи в виде линейной цепочки, то в предельно упрощенном виде она выглядит как линейный граф (рис. 1), который можно условно назвать основным вектором развития («мейнстримом эволюции») конструкций крепи. Попутно отметим, что именно в такой исторически обусловленной последовательности появления конструкций целесообразно изучать крепи в вузах горного профиля. От простейшей исходной крепи в виде стойки шло постоянное усложнение конструкций при увеличении многообразия их типов вплоть до анкера.

Однако до настоящего времени самой распространенной в Донбассе (80–90 %

протяженности всех подготовительных выработок) была стальная податливая крепь арочной и, много реже, трапециевидальной формы, выполненная из стального корытообразного спецпрофиля СВП [5, 6].

Широкому распространению стальной рамной арочной крепи способствовало образование в Донбассе своеобразного симбиоза «уголь-сталь», когда металлургия, потребляя коксующийся уголь, снабжала шахты спецпрофилем для изготовления крепи. Произошло «короткое замыкание» торгово-промышленных цепочек друг на друга, мало связанное с интересами народного хозяйства в целом.

Столь длительное применение стальной арочной крепи в угольной промышленности было во многом обусловлено ее основными преимуществами — конструктивной податливостью, простотой изготовления, установки и ремонта. Однако эффективность применения этой крепи, несмотря на многочисленные частные усовершенствования, во многих случаях оставалась довольно низкой.

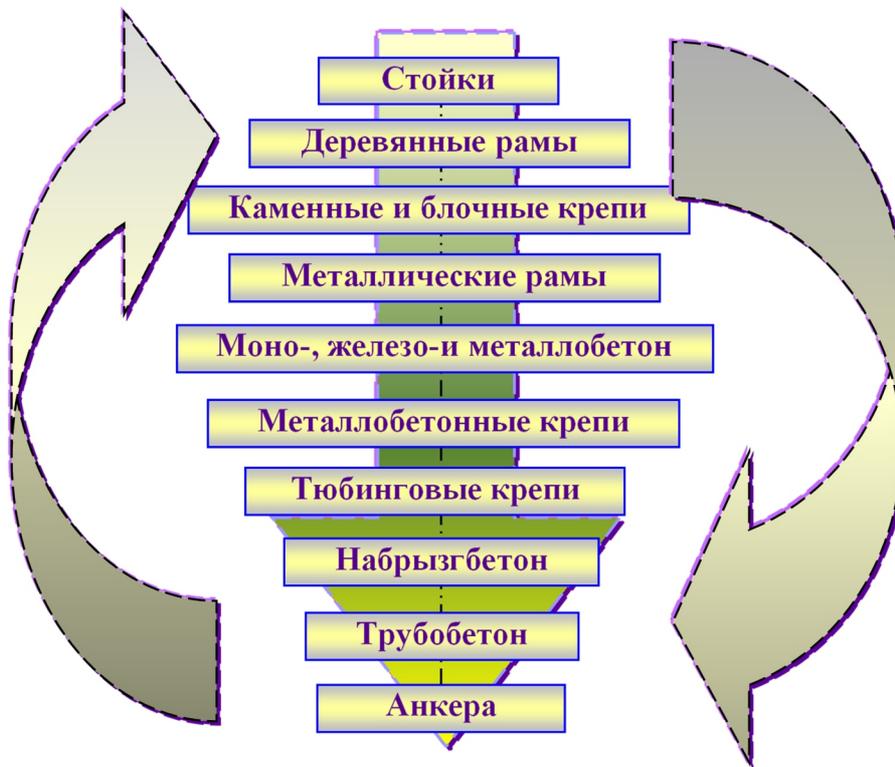


Рисунок 1 — Векторы эволюционного развития конструкций крепи

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Чтобы оценивать эффективность инженерных решений по применению крепи с позиций успешности выполнения их основного назначения — устойчивости выработок, — введем их градацию по конечным результатам принятых инженерных решений:

– **правильное**, т. е. крепь удовлетворительно соответствует горно-геологическим условиям и нормам эксплуатации выработки;

– **ошибка проектирования I рода** — когда устойчивость выработки не обеспечена из-за недопустимо деформированной крепи;

– **ошибка проектирования II рода** — когда крепь принята с излишним запасом прочности, что привело к необоснованному перерасходу трудовых и материальных ресурсов.

На основании широкомасштабных обследований состояния подземных выработок и проведенных шахтных экспериментальных наблюдений в Донбассе было установлено [5], что только 35–45 % всей протяженности подготовительных выработок отвечают условиям нормальной эксплуатации, около 20–30 % находятся в неудовлетворительном состоянии и нуждаются в ремонте и перекреплении (ошибка I рода), а остальные 30–40 % закреплены с излишними расходами и могут охраняться менее мощными конструкциями крепи (ошибка II рода). Следует иметь в виду, что часто труднее всего идентифицировать ошибку проектирования II рода, поскольку ее легко игнорируют и выработку просто отождествляют с правильным выбором крепи. В этом и состоит основа самоуспокоенности проектировщиков и производителей. Тем более, что материальный ущерб от риска допустить ошибку проектирования I рода намного меньше (в 2...3 и более раз), чем ущерб от ошибки II рода.

Такой относительно низкий уровень надежности инженерных решений в области крепления обусловлен неудовлетворительным объемом и низким качеством исходных данных при проектировании, а также высокой изменчивостью и большим разнообразием горно-геологических условий. Создавшееся в горной отрасли положение с

эффективностью поддержания горных выработок нельзя признать удовлетворительным. До сих пор не решены задачи по созданию легкой конструкции индивидуальной крепи, которая позволяла бы обеспечить усиление постоянной крепи на отдельных неустойчивых ее участках контура или протяженности, простое регулирование ее плотности установки с высокой грузонесущей способностью, предварительным распором и податливостью.

Шахтные стойки как исторически исходная конструкция могут быть использованы не только в рамной крепи подготовительных горных выработок, но и как индивидуальная крепь очистных забоев [5, 6], а также как крепь усиления для поддержания, охраны подготовительных горных выработок в зонах временного и неустановившегося опорного давления вблизи лавы. Предложенная для этих целей конструкция податливой стойки [7], в которой узел податливости выполнен на основе использования зажатия подвижного элемента болтами и создания сил трения в паре «сталь по стали», не вполне обеспечивает необходимое сопротивление податливости и поэтому нуждается в существенной доработке.

Целью исследования является совершенствование ранее разработанной новой конструкции шахтной стойки универсального применения, обладающей высоким сопротивлением и регулируемым предварительным распором при установке.

Идея работы состоит в использовании для нового узла податливости и узла предварительного распора с использованием гидроцилиндров.

Исходя из этого, **задачами** исследования являются:

- 1) разработка новой конструкции узла податливости с гидрораспором для создания между контактными поверхностями сил сопротивления податливости;
- 2) использование гидрораспорного узла податливости для создания предварительного распора стойки при ее установке;

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

3) обоснование методики расчета нового узла податливости и распорного устройства для шахтной стойки.

2 Особенности работы шахтной стойки и анкера как элементов крепи

Поучительно проследить сходство и отличия функциональных и конструктивных признаков таких, на первый взгляд, мало похожих типов крепи — рамной и анкерной.

Стойка являет собой первую крепь простейшей конструкции, тогда как анкер в определенном смысле замыкает современный этап развития технологии крепления (см. рис. 1).

Исторически необходимость ограждения породного контура выработки от обрушений, падения вывалов и породных обломков обусловила появление вначале стойки, а затем рамных и сплошных конструкций крепи.

Анкерная крепь занимает особое место в обеспечении устойчивости выработки и является как бы антиподом шахтной стойки. Анкер, в отличие от стойки, оказался на завершающем этапе эволюции крепи, и в нем получили применение новые горные технологии и материалы (бурение, химические

растворы, высокопрочные стали и пр.). Тем не менее обе сравниваемые конструкции, несмотря на принципиальные различия, имеют много общего.

С этой целью выделим общие признаки, присущие стойке и анкеру (табл. 1):

1. У них одинаковое силовое воздействие на массив в виде сосредоточенной силы, точно приложенной к породному контуру непосредственно или через дополнительные элементы.

2. Обе конструкции предназначены для работы под действием осевой (направленной вдоль продольной оси) нормальной силы, возникновение изгибающих моментов или поперечных сил является крайне нежелательным.

3. Эффективность крепи существенно повышается при создании предварительного распора в момент установки.

4. При образовании зоны запредельных деформаций вокруг выработки в условиях больших смещений породного контура необходим податливый режим работы.

5. Для предотвращения вывалов породы на соседних с крепью участках обе конструкции нуждаются в ограждении породного контура (затяжке).

Таблица 1

Сравнение особенностей взаимодействия стоечной и анкерной крепи с массивом пород

	Признаки	СТОЙКА	АНКЕР
СХОДСТВО	1 Вид нагружения	Осевая нагрузка	
	2 Контакт с породами контура	Точечный, локальный	
	3 Изгибающие моменты	Недопустимы	
	4 Предварительный распор	Необходим узел распора	
	5 Податливость	Необходим узел податливости	
РАЗЛИЧИЕ	1 Направление нагрузки	сжатие	растяжение
	2 Эксцентриситет нагрузки	вреден	отсутствует
	3 Особенности установки	внутри сечения горной выработки	в массиве пород
	4 Устойчивость по Эйлеру	возможна потеря продольной устойчивости	всегда устойчив
	5 Взаимодействие с контуром	в двух оппозитных точках контура	только в одной точке контура

Следует отметить и существенные отличия стойки и анкера:

1. Если стойка предназначена для восприятия сжимающей нормальной силы («работает на сжатие»), то анкер является единственной конструкцией крепи, которая работает на «чистое» растяжение.

2. Стойка всегда располагается внутри горной выработки и имеет два противостоящих контакта на породном контуре, а анкер, напротив, размещен вне выработки в окружающем массиве горных пород с одним контактными участком на ее контуре; поэтому условно можно считать, что по воздействию на породный контур одна стойка конструктивно равна двум анкерам.

3. Одним из самых опасных для стойки состояний является появление эксцентриситета у продольной сжимающей силы, что приводит к ее изгибу и последующей потере устойчивости, тогда как у анкера этот эксцентриситет почти всегда отсутствует, при увеличении нагрузки уменьшается и не опасен.

4. У стойки необходимо обеспечить шарнирный распор обеих ее концов на породе для исключения эксцентриситета нагружения, что для анкера необязательно и его концы взаимодействуют с породой в жестко защемленном состоянии.

5. Критическим предельным состоянием для стойки является потеря продольной устойчивости (по Эйлеру), тогда как анкер разрушается при наступлении первого предельного состояния путем разрыва штанги с образованием «шейки».

3 Разработка и обоснование основных требований к горной крепи и ее параметров

Особенности силового взаимодействия стойки с массивом горных пород позволяют сформулировать следующие требования к стоечной крепи:

– рабочее сопротивление конструкции в податливом режиме должно быть близким к предельной несущей способности крепи, а с учетом запаса прочности — не ниже 80 %;

– с целью обеспечения быстрого включения стойки в работу и максимального со-

хранения устойчивости породного контура необходимо создать предварительный распор, равный или близкий по величине сопротивлению податливости;

– минимизировать концентрацию напряжений на участке контакта крепи с породным контуром с целью снижения вероятности выколов породы под концами стойки;

– простая и быстрая разгрузка стойки от давления породного контура при её извлечении или перестановке;

– непрерывный контроль усилий на контакте «крепь — массив» и управления ими.

Деформационное взаимодействие стойки с массивом горных пород должно удовлетворять нескольким необходимым требованиям:

– раздвижность стойки должна быть не менее ожидаемых смещений породного контура выработки (как правило, с запасом 20...30 %), чтобы обеспечить нужный запас податливости;

– иметь плавную, без рывков и ударов податливость под действием нагрузки, равной рабочему сопротивлению крепи;

– при исчерпании запаса податливости перейти в жёсткий режим работы с предельным усилием отпора;

– сохранять продольную устойчивость сжатых элементов (стоек, стен) под нагрузкой;

– не деформировать (сминать или раздавливать) породы на контакте с опорами, не вдавливаясь в слабые породы кровли или почвы.

При выборе материала крепи следует ориентироваться на коэффициент его конструктивного качества, который был нами предложен ранее в виде отношения несущей способности условного куба данного материала с ребром 1 м к его массе:

$$k_M = \frac{F_1}{M_1} = \frac{[\sigma] \cdot A_1}{\gamma \cdot V_1} = \frac{[\sigma]}{\gamma}, \quad (1)$$

где $[\sigma]$ — предел прочности материала крепи на один из видов нормативных нагрузок (одноосное сжатие или растяжение, изгиб и др.), действующих на крепь, кПа;

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

γ — плотность материала крепи, кг/м³;
 $A_1 = 1$ — площадь грани условного единичного куба, м²;

$V_1 = 1$ — объем того же единичного куба, м³.

Таким образом, коэффициент конструктивного качества материала k_M имеет размерность кН/кг и учитывает соотношение прочностных свойств материала и его плотности, тем самым показывая, какую прочность может обеспечить его масса, сосредоточенная в единице объема (табл. 2).

Сравнительные расчеты показали, что на сжатие наилучшими материалами являются сосна и дуб (позиции 2 и 3 в табл. 2), пропустив впереди себя на первое место только высокопрочную легированную сталь 30ХГС с коэффициентом качества $k_M = 14$ кН/кг, равным для растяжения и сжатия. Обычные стали Ст3 и Ст5 (позиции 4 и 5 в табл. 2) с $k_M = 4,8$ и $6,4$ кН/кг уступили по конструктивному качеству дубу и сосне с коэффициентами соответственно $k_M = 6,5$ и $6,7$ кН/кг.

Худший ранг по сжатию имеют набрызг-бетон и бетон (позиции 6 и 7 в табл. 2) с соответствующими коэффициентами $k_M = 2,3$ и $1,4$ кН/кг, т. е. на порядок меньше, чем дерево.

Таблица 2

Коэффициенты конструктивного качества k_M для разных материалов крепи

Материал	Объемная масса, кг/м ³	Временное сопротивление, МПа		k_M , кН/кг	
		растяжению	сжатию	растяжению	сжатию
1 Сталь 30ХГС	7850	1100	1100	14,0	14,0
2 Сосна	600	120	40	20,0	6,7
3 Дуб	800	145	52	18,1	6,5
4 Сталь Ст5	7850	600	500	7,6	6,4
5 Сталь Ст3	7850	380	380	4,8	4,8
6 Набр.-бетон	2200	4	50	0,2	2,3
7 Бетон	2200	2	30	0,1	1,4

Заметно упростить решение задачи по выбору крепления горных выработок способны нормированные критерии технической эффективности крепи (НКТЭ). Такие критерии могут наиболее полно отражать силовые $F(t)$ и деформационные $U(t)$ резульативные показатели крепи.

Для отражения адаптивных свойств крепи при работе в условиях больших смещений можно ввести деформационный критерий эффективности K_D в виде отношения

$$K_{Di} = k_n \frac{U_i}{L_i} \cdot 100\% . \quad (2)$$

где U_i — конструктивная податливость крепи в заданном направлении смещений $i = 1, 2 \dots n$ (вертикальном, наклонном, горизонтальном и т. д.), м;

L_i — линейный размер крепи до реализации податливости в направлении смещений породного контура, м;

k_n — нормирующий множитель, который для телескопических конструкций принимает значение $k_n = 2$.

Очевидно, для жестких конструкций крепи, у которых конструктивная податливость, если пренебречь упругими их деформациями, равна $U_i = 0$, деформационный критерий принимает, согласно (2), минимальное значение $K_D = 0$. Максимальным значением деформационного НКТЭ будут обладать податливые крепи типа стоек трения или гидростоек, у которых он доходит до $K_D = 80\%$ и более.

Конкретно для податливой шахтной стойки одинарной раздвижности, у которой лишь одно направление податливости, совпадающее с ее продольной осью, получаем $k_n = 2$ и формула принимает следующий вид:

$$K_D = 2 \frac{U}{L} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Для критериальной оценки силовых показателей крепи при ее взаимодействии с массивом горных пород введем силовой критерий эффективности K_F , по аналогии с

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

коэффициентом конструктивного качества материала k_M , в виде

$$K_F = k_n \frac{F_k}{M_k} \tag{4}$$

где k_n — нормирующий множитель, который вводится с той целью, чтобы значение критерия эффективности находилось в пределах $0 \leq K_F \leq 1$;

F_k — грузонесущая способность (рабочее сопротивление) крепи, кН;

M_k — масса крепи (рамы или 1 м сплошной крепи), кг.

Следовательно, силовой критерий K_F показывает, насколько эффективно используются прочностные свойства материала, из которого изготовлена крепь. Деформационный критерий K_D отражает адаптивные возможности крепи при её смещениях по сравнению с идеальной податливостью. И, наконец, критерий работоспособности K_W указывает на КПД (долю возможной работы) конструкции в процессе взаимодействия с породным массивом.

Наиболее эффективна по силовому критерию анкерная крепь $K_F = 63 \%$, т. к. она достигает более чем половины значения коэффициента конструктивного качества материала, из которого она изготовлена. Ни одна из существующих конструкций крепи не смогла хотя бы наполовину приблизиться к показателю анкера по силовому критерию $K_F = 60\text{--}70 \%$, оставаясь в пределах $0\text{--}25 \%$. Худшими по силовому критерию K_F оказались рамные деревянная и стальная крепи, что обусловлено неравнопрочностью конструкции. Это объясняется низкой грузонесущей способностью самого ответственного элемента — верхняка, работающего на продольно-поперечный изгиб.

Деформационные свойства крепей, представленные критерием K_D , различаются столь же разительно: от 10 до 80 %. Лучшими деформационными критериями (до 80 %) обладают стойки трения и некоторые гидростойки, в которых практически до предела использован возможный запас

раздвижности. В разы хуже критерий K_D у крепей с малой конструктивной податливостью: это рамная деревянная крепь (10–15 %) и стальная крепь из спецпрофиля (в пределах 25–30 %).

Для оценки работоспособности крепи можно получить из равенств (2) и (4) путем «свертки» этих двух взаимно дополняющих друг друга критериев — силового K_F и деформационного K_D :

$$K_W = K_F \cdot K_D = 2 \frac{\gamma \cdot F_k}{[\sigma] \cdot M_k} \cdot \frac{U}{L} \cdot 100\% \tag{5}$$

Какими нормированными коэффициентами технической эффективности (НКТЭ) обладают известные типы крепи, можно проследить по данным таблицы 3. Диапазон допустимого изменения каждого из критериев от 0 до 100 %. В таблице крепи ранжированы по степени возрастания результирующего критерия — НКТЭ работоспособности крепи K_W .

Таблица 3

Критерии НКТЭ шахтных крепей

	Название крепи	НКТЭ %		
		K_F	K_D	K_W
1	Рамная крепь из дерева	0,2	13	0,0
2	Стойка дерев. d = 24 см	3	13	0,3
3	Рамная стальная крепь	2	25	0,4
4	Посадочная стойка ОКУ06	14	14	2
5	Посадочная крепь «Спутник»-ГУ	4	57	3
6	Стойка стальная из СВП-27	5	67	3
7	Гидростойка 2ГСК-13	11	53	6
8	Гидростойка 2ГВС13	12	53	6
9	Гидростойка 2ГВТ4	25	38	9
10	Анкер d = 32	63	20	11
11	Стойка трубчато-желобчатая 9Т25Ж	15	71	11
12	Угловая стойка трения 8Т20У	16	72	12
13	Стойка трения 6Т20	20	80	16
14	Гидростойка (ГСУМ1)	25	81	20
15	Угловая стойка трения 1Т15У	28	71	20

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Итоговый критерий технической эффективности K_W отражает работоспособность крепи, выраженную в процентах, и не превышает 20 % у стоек (табл. 2, п. 14 и 15). Минимальное значение (доли процента) работоспособности показали существующие рамные стальная и деревянная крепи.

Такие недопустимо низкие значения критериев работоспособности K_W и силовых показателей K_F показывают, что привычные конструктивные решения рамной крепи далеко не в полной мере реализуют деформационно-прочностные показатели материалов, из которых они изготовлены. Основную причину такого несоответствия показателей крепи и крепежного материала следует усматривать в его нерациональном конструктивном использовании, особенно когда элементы рамной крепи проектируют на изгибающие нагрузки.

Более наглядное сопоставление результатов показателей разных типов крепи дает гистограмма на рисунке 2.

В то же время, исходя из проведенного анализа, следует, что самыми эффективными конструкциями крепи являются податливая стойка трения, работающая на осевое сжатие, и анкер при осевом растяжении. Однако у стойки трения при высоком деформационном критерии ($K_D = 70\text{--}80\%$) оказался низким силовой критерий ($K_F = 15\text{--}20\%$), как показал анализ, из-за несовершенства узлов податливости. У анкера критерии эффективности зеркально антисимметричны: самый высокий силовой критерий эффективности ($K_F = 60\text{--}70\%$) при весьма низком деформационном критерии ($K_D = 20\%$).

Направление модернизации этих крепей должно быть направлено на устранение присущих им и количественно оцененных техническими критериями недостатков. Для стоек — значительное повышение силового критерия путем создания новых узлов податливости с высоким сопротивлением, а для анкеров — изменение конструкции в направлении существенного повышения податливости.

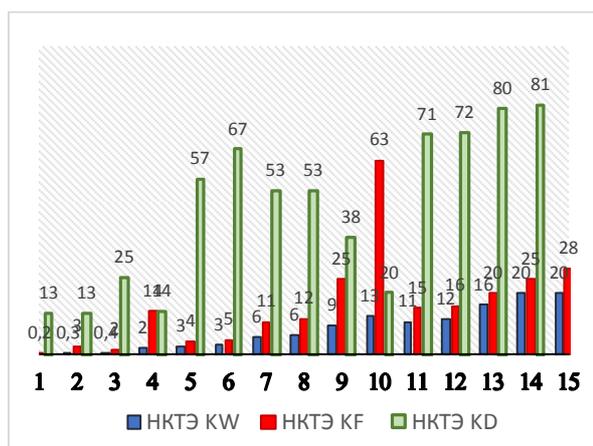


Рисунок 2 — Гистограмма НКТЭ (по оси абсцисс расположены номера типов крепи согласно табл. 2)

Таким образом, научно обосновывается прогноз эволюции развития конструкций горной крепи как сочетание наиболее удачных показателей стоечной и анкерной конструкции в направлении достижения их высоких деформационно-силовых критериев. Назовем условно такую новую конструкцию крепи стоечно-анкерной; при этом в ней следует избегать элементов, работающих на изгиб, у которых недопустимо низкие критерии технической эффективности.

Отметим и важные выводы, которые следует сделать относительно формы пластовых подготовительных выработок, особенно в зоне вредного влияния очистных работ. Новый тип стоечно-анкерной крепи потребует, во-первых, отказа от рамных крепей с применением спецпрофиля и, во-вторых, повсеместного перехода от арочной формы выработок к прямоугольной, что резко снизит производственные затраты и повысит безопасность горных работ.

4 Разработка конструкции и параметров распорно-податливых стоек

Базируясь на результатах проведенного анализа работы различных конструкций шахтной крепи в предыдущем разделе, рассмотрим конструктивные особенности распорно-податливых стоек нового технического уровня.

Ранее [7] была разработана конструкция стойки КСТ, которая по своему типу относится к раздвижным податливым стойкам с узлом податливости на основе трения, а по рабочей характеристике — к стойкам постоянного сопротивления.

Стойка трения постоянного сопротивления СТБ (рис. 3) состоит из корпуса 1, штока (выдвижной части) 2 и узла податливости (замка) 3.

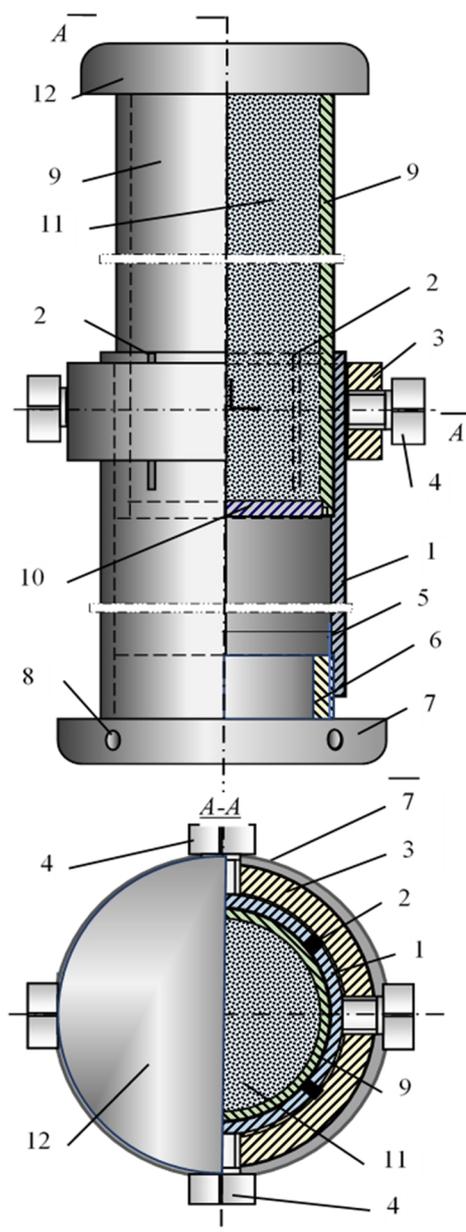


Рисунок 3 — Конструкция трубобетонной стойки трения постоянного сопротивления (СТБ)

Корпус 1 стойки изготовлен из трубного профиля. Верхняя часть корпуса 1 снабжена продольными прорезями 2, на которые установлен замок (узел податливости) в виде обоймы 3 с резьбовыми отверстиями, куда ввинчены силовые болты 4. Нижняя часть корпуса снабжена внутренней резьбой 5, на которую ввинчена трубная втулка 6, приваренная к нижней опоре 7. На ней предусмотрены отверстия 8 для создания предварительного распора стойки между кровлей и почвой при установке путём вращения опоры 7 посредством рычага (не показан). В корпус 1 вставлен шток 9 как выдвижная часть стойки в виде трубы. Труба штока снабжена приваренным днищем 10 и заполнена бетоном 11.

Таким образом, используется не пустая труба, а шток в виде трубобетона, что даёт значительные преимущества при обеспечении жёсткости и несущей способности конструкции. На верхний конец штока 9 установлена опора 12.

Принцип работы стойки следующий. Стойку доставляют в подготовительную выработку в полностью собранном виде с узлом податливости, силовые болты 4 которого с заданным усилием расперты между обоймой 3 и верхней частью корпуса с прорезями 2. Тем самым создаются радиальные силы, зажимающие шток 9 в верхней части корпуса 1. Стойку устанавливают по нормали между кровлей и почвой, затем производят её предварительный распор путём вращения нижней опоры 7 с помощью рычага, вставленного в отверстия 8.

При нагрузке на стойку со стороны пород шток 9 удерживается силами трения, возникающими в результате зажатия верхней части трубы корпуса 1 симметрично размещёнными силовыми болтами 4, взаимодействующими с обоймой 3. Пока нагрузка на стойку не превышает её рабочее сопротивление, заданное силовыми болтами 4, стойка работает в упругом режиме. Как только нагрузка окажется равной рабочему сопротивлению стойки, начинается её работа в податливом режиме

путём проскальзывания штока 9 относительно верхней части корпуса 1 в узле податливости с преодолением сил сопротивления трения. Деформирование стойки происходит при постоянном рабочем сопротивлении на всём пути запаса податливости, длина которого может достигать почти половины высоты стойки.

К достоинствам конструкции можно отнести использование трубного проката как наиболее распространённого и экономически выгодного, а также применение трубобетона, который в настоящее время ввиду ряда преимуществ является одним из самых перспективных в строительной индустрии. Кроме того, в данной стойке используется минимальное число деталей, которые требуют изготовления с использованием станочного парка, что заметно снижает ее стоимость.

Однако имеется и ряд недостатков, в первую очередь это сложность изготовления распорного узла 6, 7, неудобство создания и недостаточность распорного усилия при установке стойки, возможность заклинивания узла податливости.

Поэтому была разработана модификация стойки трения, где ряд упомянутых недостатков был устранен. Новая стойка получила название СПТБ (стойка податливая трубобетонная), и ее основные отличия в том, что узел податливости был модернизирован и заменен распорный узел на нижней опоре стойки (рис. 4). Последний был выполнен в виде двух плит — верхней и нижней, — которые раздвигаются вертикально установленными винтовыми парами.

Однако достигнуть повышения распорного усилия и здесь достаточно сложно ввиду необходимости совместного вращения гаек, при этом заметно увеличивается масса стойки и сложность ее изготовления.

Надо отметить и главный недостаток рассмотренных конструкций стоек — использование для создания сопротивления

податливости эффекта сухого трения между парами «сталь по стали», коэффициент трения f между которыми составляет от $f=0,2\dots0,3$, что оказалось явно недостаточным для обеспечения доставочного сопротивления податливости в пределах 25–40 тс на установленную стойку трения.

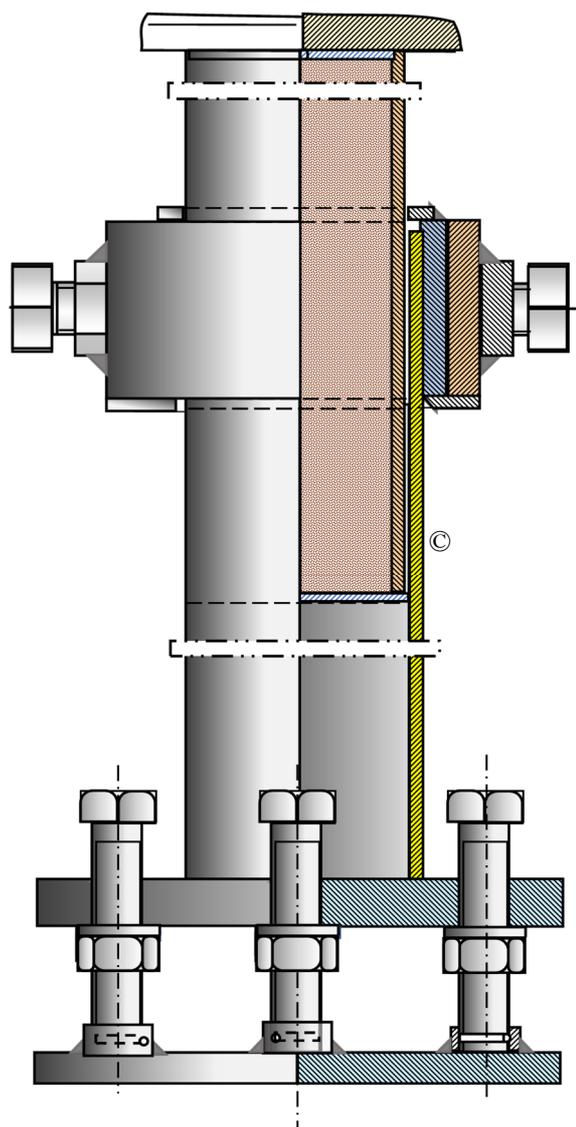


Рисунок 4 — Модернизация трубобетонной стойки трения постоянного сопротивления с новым распорным узлом¹

¹ Автор благодарит горных инженеров Пунтуса В. Ф. и Кладко В. И. за полезное обсуждение конструкции стойки и участие в ее испытаниях.

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

С этой целью необходимо разработать новый узел податливости, который позволит использовать иную пару трения вместо «сталь по стали» со значительно большим коэффициентом трения. Фрикционные материалы (ФМ) работают в тормозных устройствах, которые предназначены для поглощения кинетической энергии движущейся массы и перевода ее в тепловую энергию. Однако для особых условий использования в конструкции узла податливости стойки трения необходимо обеспечить как можно более высокий коэффициент трения.

Как известно, сила трения скольжения возникает между соприкасающимися телами при их относительном движении и зависит от силы давления N тел друг на друга (силы реакции опоры), от материалов трущихся поверхностей (коэффициента трения скольжения f , от скорости относительного движения, но не зависит от площади соприкосновения.

$$F = f \cdot N. \tag{6}$$

Наиболее перспективными фрикционными парами для узла податливости со стальной трубой можно считать алюминий ($f=0,5...0,6$), шину ($f=0,5...0,7$), тормозную накладку ($f=0,5...0,6$) и некоторые другие.

Для создания напорного усилия на пару скольжения можно использовать узел податливости с винтовым нагружением (см. рис. 3, 4), но более эффективной и технически привлекательной может быть конструкция узла податливости со всесторонним обжатием штока из трубобетона [8, 9] равномерным давлением газа или жидкости (рис. 5).

Трубобетонный шток 1 с концевыми заглушками 2 входит внутрь трубы-основания 3 , которая сверху ограничена кольцевым фланцем 4 , а снизу опирается на опорный башмак (не показан). Податливый узел выполнен в виде кольцевой обоймы 5 , которая опирается на фланец 4 и внутри содержит полость 6 , с внутренней ее стороны размещены слой 7 трибоматериала (например, дюралюминий, шинная резина и пр.) и вакуумная резина 8 с полостью 6 , соединенной с ниппелем 9 .

Узел податливости надевают на конец трубобетонного штока 1 , который вставляют в трубу-основание 3 вплоть до упора в кольцевой фланец 4 . Для создания обжатия штока 1 в полость 6 кольцевой обоймы 5 подают через ниппель 9 из баллона (не показан) газ или жидкость под необходимым давлением (15...20 МПа). Вакуумная резина несжимаема, т. к. ее коэффициент Пуассона $\nu=0,5$, поэтому ведет себя как жидкость и передает всестороннее давление по всей обойме 5 , равномерно прижимая слой 7 трибоматериала к внешней поверхности штока 1 из трубобетона.

Сила прижатия слоя 7 к внешней поверхности штока 1 равна

$$N_7 = p \cdot A_7 = p \cdot \pi \cdot d \cdot h_7, \tag{7}$$

где p — давление в полости 6 , МПа;
 A_7 — площадь цилиндра обжатия, м²;
 d — диаметр штока, м;
 h_7 — высота слоя 7 трибоматериала, м.

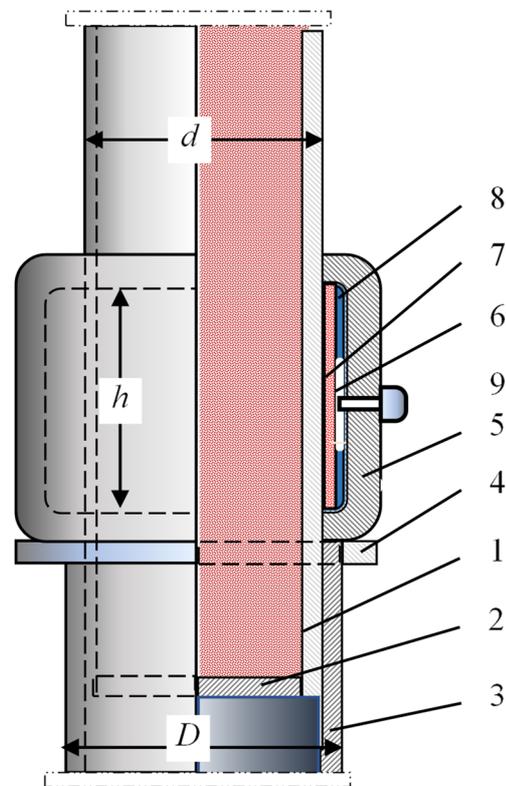


Рисунок 5 — Новый узел податливости для распорно-податливой трубобетонной стойки трения

Необходимую толщину t_5 стенки кольцевой обоймы 5 с некоторым запасом, без учета упрочняющего эффекта от концевых фланцев обоймы, можно найти из формулы

$$t_5 = p \cdot D_5 / [\sigma_s], \quad (8)$$

где D_5 — внешний диаметр обоймы 5, м; $[\sigma_s]$ — допустимое напряжение материала обоймы на разрыв, МПа.

Для создания предварительного распора трубобетонной податливой стойки в кровлю и почву выработки наиболее целесообразно также использовать давление газа или жидкости, создавая его в цилиндре нижней опоры основания 3 трубы (рис. 6).

Узел распора стойки состоит из корпуса цилиндра 1, в котором установлен плоский поршень 2, а для горизонтальной фиксации нижнего конца трубы-основания 3 стойки к нему сверху приварен кольцевой фланец 4. Внутри цилиндра по его периферии размещено кольцо 5 из вакуумной резины, которое служит герметизатором и распределителем давления. В поршень 2 вмонтирован ниппель 6, через который подают газ в цилиндр под необходимым (15...20 МПа) давлением из переносного баллона (не показан). На верхний обрез цилиндра 1 прикреплен (например, на резьбе) кольцевой ограничитель 7, в который упирается поршень 2 при выдвигании под действием давления в верхнее положение.

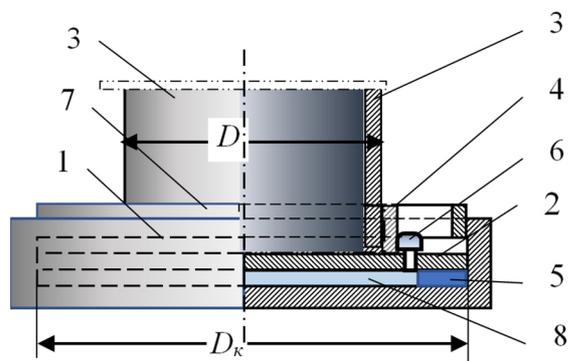


Рисунок 6 — Узел предварительного распора на нижней опоре шахтной стойки

Работает узел распора стойки следующим образом. Нижний конец трубы-основания 3 шахтной стойки устанавливают на поршень 2 внутри кольцевого фланца 4 и выдвигают трубобетонный шток стойки (см. рис. 6) вверх до упора в породный контур, а затем производят его обжатие до проектной величины с помощью узла податливости путем подачи газа или жидкости (например, воздуха или воды) через ниппель под давлением. После этого начинают таким же образом выполнять пневмораспор стойки, подавая газ под давлением в камеру 8 через ниппель 6, при этом поршень 2, поднимаясь, передает усилие на стойку и тем самым осуществляет ее пневмораспор. Демонтаж стойки производят путем сброса давления в узлах податливости или распора через соответствующие ниппели.

Для определения силы F предварительного распора стойки можно использовать уравнение

$$F = p_p \cdot A_k = p_h \cdot \pi \cdot D_k^2 / 4, \quad (7)$$

где p_p — давление в камере распора 8, МПа;

A_k — площадь камеры распора 8, м²;

D_k — диаметр камеры 8, м.

Пример расчета стойки

Определим параметры податливо-распорной стойки с сопротивлением податливости 300 кН и общей длиной 2,5 м. Примем из конструктивных соображений диаметр трубобетонного штока $d = 80$ мм, а внешний диаметр трубы-основания 3 $D = 90$ мм.

1. Расчетные параметры узла податливости (рис. 5).

Необходимую высоту h_7 слоя трибоматериала 7 в узле податливости получим из (7), учитывая коэффициент его трения по штоку $f_7 = 0,5$ и задавая давление в камере 6 обоймы 5 $p = 20$ МПа:

$$h_7 = N \cdot (f_7 \cdot p \cdot \pi \cdot D)^{-1} = 3 \cdot 10^{-2} \cdot (0,5 \cdot 20 \cdot \pi \cdot 0,08)^{-1} = 0,12 \text{ м.}$$

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Согласно (8) находим толщину стенки обоймы 5:

$$t_5 = p \cdot D_5 / [\sigma_s] = 20 \cdot 0,11 / 240 = 0,01 \text{ м.}$$

Объем жидкости V_6 , которую следует закачать под давлением в камеру 6 шириной $t_6 = 1$ см и высотой $h = 12$ см определим с учетом заполнения камеры слоем трибома-терияла и двумя кольцами вакуумной резины на 90 %:

$$V_6 = \pi \cdot d \cdot h \cdot t_6 \cdot 0,1 = \\ = \pi \cdot 8 \cdot 12 \cdot 1 \cdot 0,1 = 30 \text{ см}^3.$$

2. Расчетные параметры узла предварительного распора (рис. 6).

Требуемый для распора стойки силой 300 кН диаметр цилиндра 8 равен

$$D_8 = (F_p / \pi \cdot p_p)^{0,5} = (30 / \pi \cdot 20 \cdot 10^3)^{0,5} = 0,12 \text{ м.}$$

Ход движения поршня 2 до ограничителя 7 принимаем $h_2 = 40$ мм, высота стенки цилиндра 8 тогда составит

$$h_8 = 40 + 20 = 60 \text{ мм.}$$

Толщина t_8 стенки цилиндра 8 из условия разрыва давлением $p = 20$ МПа, без учета днища и толщины ограничителя 7, что идет в запас прочности, составит

$$t_8 = p \cdot D_8 / [\sigma_s] = 20 \cdot 0,12 / 240 = 0,01 \text{ м.}$$

Определяем высоту h_7 резьбы ограничителя 7, установленного на внутренней поверхности цилиндра 8, из условий прочности ее на срез $[\tau_s] = 120$ МПа от усилия распора $F_7 = 300$ кН:

$$h_7 = F_7 / (\pi \cdot D_8 \cdot [\tau_s]) = \\ = 300 \cdot 10^{-3} / (\pi \cdot 0,12 \cdot 120) = 7 \text{ мм.}$$

Сделанная оценка массы распорно-податливой стойки длиной 2,5 м показывает, что она складывается из суммы масс трубобетона 1 длиной 0,8 м $m_1 = 16,8$ кг, трубы основания 3 длиной 1,8 м $m_3 = 19,8$ кг, узла податливости $m_{УП} = 6,5$ кг, узла распора $m_{УР} = 6,2$ кг и верхней опоры $m_{ВО} = 4$ кг, что в итоге дает

$$m_C = \sum m_i = m_1 + m_3 + m_{УП} + m_{УР} + m_{ВО} = \\ = 16,8 + 19,8 + 6,5 + 6,2 + 4 = 53,3 \text{ кг.}$$

Таким образом при массе стойки менее 54 кг ее расчетная несущая способность равна сопротивлению податливости и предварительному распору 300 кН, а запас податливости принят равным 700 мм. Следует отметить, что запас податливости стойки длиной 2,5 м можно увеличить до 1200 мм за счет увеличения длины трубобетонного штока.

Если выполнить сравнение по нормированным коэффициентам технической эффективности новой стойки с традиционной конструкцией из спецпрофиля СВП-27, то получим следующие числовые данные (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение параметрических показателей старой и новой стоечной крепи

Параметр крепи	Стойки		Соотношение
	СВП-27	Новая	
Длина, м	2,5	2,5	1,0
Отпор, кН	100	300	3,0
Податливость, мм	700	700	1,0
Предварит. распор, кН	нет	300	-
Масса, кг	75,5	53,3	0,7
Критерий K_D	0,56	0,56	1,0
Критерий K_F	1,32	5,62	4,2
Критерий K_W	0,74	3,15	4,3

Как следует из сравнения показателей, новая распорно-податливая стойка значительно превосходит существующие конструкции по важнейшим показателям: по несущей способности — в 3 раза, по силовому коэффициенту и работоспособности — в 4,2 раза, вдобавок способна обеспечить высокий предварительный распор.

У предложенной новой шахтной стойки есть дополнительные преимущества:

– малая масса и размеры, что заметно снижает трудоёмкость и длительность процесса крепления;

– простота конструкции, изготовление из стандартных деталей и труб, отказ от

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

применения дорогого и тяжелого спецпрофиля СВП;

– трубобетон, из которого выполнен шток, позволяет придать высокую жёсткость для сопротивления продольному изгибу;

– круглая форма стоек имеет низкое аэродинамическое сопротивление вентиляционной струе в горной выработке, что заметно снижает затраты на проветривание;

– узел предварительного распора повышает эффективность стойки, которая выходит на податливый режим с предельным постоянным рабочим сопротивлением;

– удобная технология монтажа и демонтажа, многократное повторное использование с заранее предустановленным узлом податливости и его рабочим сопротивлением;

– сменные конструкции верхней и нижней опор стойки учитывают различные горно-геологические условия её работы (прочность пород, угол падения, контактные неровности, различные комбинации с другими типами крепи и т. д.);

– широкая область применения для крепления, поддержания и охраны подготовительных горных выработок, пройденных по простиранию или падению пластов.

Выводы:

– стальная рамная крепь из спецпрофиля по своим конструкторско-технологическим и стоимостным параметрам устарела и должна быть заменена на анкерно-стоечные крепи;

– анкерная и стоечная крепи обладают наилучшими нормированными коэффициентами технической эффективности и взаимно дополняют друг друга даже в сложных горно-геологических условиях;

– анализ различных конструкций шахтных стоек и особенностей их взаимодействия с массивом позволил сформулировать основные требования к их конструкции;

– разработана конструкция и обоснованы параметры и новой распорно-податливой трубобетонной стойки, у которой заметно выше технико-экономические показатели, что позволяет перейти к созданию нового типа крепления подготовительных горных выработок и отказу от стальных рамных крепей.

Список источников

1. Каретников В. Н., Клейменов В. П., Нурдихин А. Г. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок : справочник. М. : Недра, 1989. 571 с.

2. Rulka K. *Stalowe obudowy odrzwiowe. Nove rozwiazanie konstrukcyjne i metode projektowania. Praca zbiorowa.* Katowice : GIG, 2008. 263 p.

3. Jovanovic P. *Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorija / Rudarsko-geoloski fakultet Univerziteta u Beogradu. Rudarstvo, 1994. Kn. 1–3. 518 s.*

4. Баклашов И. В., Картозия Б. А. *Механика подземных сооружений и конструкции крепей : учебник для вузов. 3-е изд., стер.* М. : Студент, 2012. 543 с.

5. Литвинский Г. Г. *Стальная крепь горных выработок.* Киев : Техника, 1999. 216 с.

6. Hoek E. *Practical Rock Engineering.* 2010. 237 p. URL: www.rockscience.com/educational/hoeks_corner.

7. Литвинский Г. Г. *Шахтная трубобетонная стойка // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2019. № 17 (60). С. 5–16. EDN XXXJJJ*

8. M. H. Lai, J. C. M. Ho. *Behaviour of uni-axially loaded concrete-filled-steel-tube columns confined by external rings.* 2020. DOI: 10.1002/tal.1046

9. Zhimin Huang, Lei Zhang, Zhanguo Ma. *Study on the Mechanical Relationship among the Backfilling Mining Support, Roof Rock Beam, and Gangue Filling Body in Comprehensive Mechanized Filling Mining Process // Advances in Civil Engineering.* 2020. DOI: 10.1155/2020/8824735

Рекомендована к печати д.т.н., г.н.с., директором РАНИМИ ДНР Дрибаном В. А.
д.т.н., проф. каф. ГЭС ДонГТУ Корнеевым С. В.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Литвинский Г. Г., д-р техн. наук, профессор каф. геотехнологии и безопасности производств Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: ligag@ya.ru

Litvinsky G. G. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, e-mail: ligag@ya.ru)

JUSTIFICATION AND DEVELOPMENT OF A NEW SUPPORT CONSTRUCTION WITH STRUT-SUPPORTING TUBE-CONCRETE RACK

Retrospective analysis of vectors and timing of mine support structure development is given. It is shown that steel frame arch supports have become a brake on the development of mining technology and should be replaced by rack-and-frame structures. The features of the work of mine racks are considered and the requirements for them are formed, the comparison of indicators of the rack and anchor supports is performed. Standardized criteria for the technical efficiency of the fastener are proposed and assessments of coefficients for the structural quality of fasteners are given. It is shown that anchors and racks are the best in terms of their criteria of technical efficiency. The existing rack designs are critically reviewed and their main disadvantages are identified. New designs of joints mobility and preliminary split of racks have been developed based on using the hydraulic cylinders to create appropriate forces in the structure. Radial uniform compression of the tube-concrete rack is a new feature in the joint mobility of the developed shaft rack construction, created in a cage coaxial with the rack, using a tribomaterial with a high friction coefficient. The pre-strut assembly of the mine support is made in the form of a lower support of the rack, where the strut cylinder with vacuum rubber is arranged. The main parameters of the new rack design are determined and an example of its calculation is given. It is shown that a strut-supporting rack can become the basis for the development of a shaft rack-frame support of a new technical level.

Key words: *shaft support, frame support, shaft rack, anchor, standardized criteria of technical level, fastening materials, shaft rack construction, joint mobility, pre-strut assembly, tube-concrete, rack calculation.*

References

- 1. Karetnikov V. N., Klejmenov V. P., Nuzhdihin A. G. Fastening of capital and preparatory mine workings: handbook [Kreplenie kapital'nyh i podgotovitel'nyh gornyh vyrabotok : spravochnik]. M. : Nedra, 1989. 571 p. (rus)*
- 2. K. Stalove obudovy odrzwiowe. Nove rozwiazanie konstrukcyjne i metode projektowania. Praca zbiorowa. Katowice : GIG, 2008. 263 p.*
- 3. Jovanovic P. Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorija. Rudarsko-geoloski fakultet Univerziteta u Beogradu. Rudarstvo, 1994. Kn. 1–3. 518 s.*
- 4. Baklashov I. V., Kartoziya B. A. Mechanics of underground structures and casing design : textbook. 3rd ed. stereotype edition [Mekhanika podzemnyh sooruzhenij i konstrukcii krepelj : uchebnik dlya vuzov.3-e izd., ster]. M. : Student, 2012. 543 p. (rus)*
- 5. Litvinsky G. G. Steel joint of mining workings [Stal'naya krep gornyh vyrabotok]. K. : Tekhnika, 1999. 216 p. (rus)*
- 6. Hoek E. Practical Rock Engineering. 2010. 237 p. URL: www.rockscience.com/educatinal/hoek_corner.*

7. Litvinsky G. G. *Mine pipe-concrete column [Shahtnaya trubobetonnaya stojka]. Scientific works collection of DonSTU. 2019. No. 17 (60). Pp. 5–16. (rus)*

8. M. H. Lai, J. C. M. Ho. *Behaviour of uni-axially loaded concrete-filled-steel-tube columns confined by external rings. 2020. DOI: 10.1002/tal.1046*

9. Zhimin Huang, Lei Zhang, Zhanguo Ma. *Study on the Mechanical Relationship among the Backfilling Mining Support, Roof Rock Beam, and Gangue Filling Body in Comprehensive Mechanized Filling Mining Process. Advances in Civil Engineering. 2020. DOI: 10.1155/2020/8824735*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Litvinsky Garry Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: ligag@ya.ru

Зотов В. А.

Донбасский государственный технический университет

E-mail: vadim_zotov@mail.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ С БОЛЬШИМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Работа посвящена разработке методики расчета переходных процессов в динамических системах с большим запаздыванием. Предложено для расчетов использовать модифицированный метод последовательного интегрирования. Показан алгоритм расчета, который может использоваться при создании автоматических систем для горного производства.

Ключевые слова: система, запаздывание, параметры, свойства, входное воздействие, выходная координата, отрезок времени, шаг квантования.

Системы автоматического управления (САУ) часто приходится строить для объектов, обладающих большим запаздыванием, когда запаздывание в несколько раз больше постоянной времени объекта управления. При этом необходимо рассчитывать переходные процессы в системе. Обычно рассчитываются реакции системы на типовые задающие и возмущающие воздействия. Однако наличие существенного запаздывания затрудняет решение данной задачи.

Это особенно актуально при автоматизации технологических процессов горного производства: конвейерного транспорта, проветривания горных выработок, флотации и сушки угольного концентрата, и многих других, у которых наиболее эффективные каналы управления обладают запаздыванием, в несколько раз превышающим постоянные времени.

Для вычисления процессов в САУ с запаздыванием (рис. 1, а) часто используют непрерывную эквивалентную функцию в виде ряда Тейлора, дроби Падэ или цепи апериодических звеньев [1–4]. Однако при таком подходе для получения достаточно точного решения необходимо использовать большое количество составляющих эквивалентной функции, что усложняет решение задачи. Если запаздывание соизмеримо с постоянными времени объекта управления, то решение с приемлемой точностью можно получить только с помощью цифровых моделей и компьютерной техники.

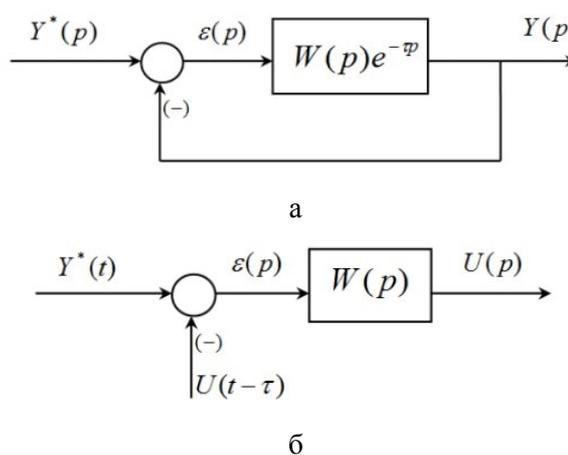


Рисунок 1 — САУ с запаздыванием (а) и разомкнутая часть САУ без запаздывания (б)

При некоторых допущениях для решения таких задач возможно использование классических методов теории дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом [5]. Но эти методы разработаны для использования при малом отклонении аргумента. В практических задачах, особенно при анализе систем управления объектами горного производства, зачастую чистое запаздывание соизмеримо с постоянной времени или больше последней в несколько раз. В результате практическое применение указанных методов становится затруднительным и зачастую невозможным. Это создает дополнительные трудности при создании автоматических систем, использующих расчет процессов в

реальном времени с целью прогнозирования поведения системы, что снижает точность управления.

Точным методом решения этой задачи является метод последовательного интегрирования (метод шагов), заключающийся в том, что непрерывное решение рассматриваемой задачи определяется из уравнения без запаздывания [6]. При этом отрезок, на котором требуется найти решение, разбивается на промежутки, равные величине чистого запаздывания. Внутри каждого промежутка определяется свое решение. В этом случае возникают сложности с составлением и решением дифференциальных уравнений, описывающих поведение системы на каждом промежутке.

Каналы управления многими объектами горного производства, обладающие наибольшей чувствительностью к управляющим воздействиям, как правило, описываются динамическими звеньями с существенным запаздыванием. Существующие методы расчета переходных процессов в системах с такими объектами либо не обеспечивают приемлемой точности, либо неудобны для создания систем управления, использующих расчеты в реальном времени. Для устранения этого недостатка следует использовать точный метод последовательного интегрирования, но доработать его, чтобы на каждом шаге не требовалось решение дифференциальных уравнений.

В связи с этим **целью** настоящей работы является модификация метода последовательного интегрирования для упрощенного расчета переходных процессов в системах с существенным запаздыванием.

Объект исследования — каналы управления объектами горного производства с существенным запаздыванием.

Предмет исследования — закономерности протекания переходных процессов в системах с существенным запаздыванием, позволяющие упростить расчеты процессов реагирования на управляющие воздействия.

Задачи исследования:

- оценка возможности определения реакции системы с объектом, обладающим существенным запаздыванием, без аппроксимации объекта непрерывной функцией;
- разработка методики упрощенного расчета переходных процессов в замкнутой системе автоматического управления на основе метода последовательного интегрирования.

Исследование и построение методики расчета переходных процессов в системах автоматического управления с существенным запаздыванием проводилось на основе логико-структурного анализа. Точность расчетов проверена путем сравнения с результатами численных экспериментов.

При допущениях, что параметры системы являются постоянными во времени, можно использовать предлагаемую модификацию метода последовательного интегрирования.

Отрезок времени, на котором требуется найти решение, разбивается на промежутки, длительность которых равна τ . Система рассматривается в разомкнутом виде без запаздывания. Для этого передаточная функция разомкнутой части системы разделяется на две части, включенные последовательно, одной из которых является звено чистого запаздывания. Затем звено запаздывания и обратная связь из структурной схемы системы исключаются (рис. 1, б).

В дальнейших расчетах участвуют только выходная координата разомкнутой части без запаздывания $U(t)$, управляющее воздействие $Y^*(t)$, рассогласование $\varepsilon(t)$ и передаточная функция разомкнутой части системы без запаздывания $W(p)$. Вместо сигнала обратной связи используется зависимость $U(t)$, сдвинутая влево по оси времени на величину запаздывания $U(t-\tau)$. Входным воздействием разомкнутой части системы на n -м промежутке $\varepsilon(t)_n$ считается разность между управляющим воздействием $Y^*(t)_n$ и выходной координатой разомкнутой части без запаздывания на предыдущем $n-1$ промежутке $U(t)_{n-1}$:

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

$$\begin{aligned} \varepsilon(t)_n &= Y^*(t) - U(t - \tau) = \\ &= Y^*(t)_n - U(t)_{n-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

В этом случае изображение по Лапласу выходной координаты

$$\begin{aligned} U(p)_n &= \frac{U(\tau)_{n-1}}{p} + \\ &+ L[Y^*(t)_n - U(t)_{n-1}] \cdot W(p), \end{aligned} \quad (2)$$

где $U(\tau)_{n-1}$ — ордината переходного процесса в конце $n-1$ промежутка.

Искомая реакция системы получается простым смещением вправо по оси времени на величину запаздывания оригинала выходной координаты разомкнутой части без запаздывания.

Слагаемое $U(\tau)_{n-1}/p$ образовано следующим образом. Решение на n -м промежутке представляет собой сумму свободной и вынужденной составляющих переходного процесса. Свободная составляющая является обратным преобразованием Лапласа изображения решения на данном промежутке. Вынужденная составляющая есть численное значение ординаты переходного процесса в конце $n-1$ промежутка $U(\tau)_{n-1}$, изображение по Лапласу которой

$$U(\tau)_{n-1} \longrightarrow \frac{U(\tau)_{n-1}}{p}.$$

Определяя переходный процесс в системе (рис. 1, а) как реакцию на управляющее воздействие $Y^*(t)$ при нулевых начальных условиях, заметим, что на первом промежутке времени $[0; \tau]$ звено запаздывания сигнал не выдает, значит, выходная координата системы на этом промежутке

$$Y(t)_1 = 0.$$

При этом рассогласование равно управляющему воздействию:

$$\varepsilon(t) = Y^*(t).$$

Следовательно, выходная координата разомкнутой части на данном промежутке

$$U(p)_1 = Y^*(p)_1 \cdot W(p) \longrightarrow U(t)_1.$$

В течение второго промежутка времени $[\tau; 2\tau]$ на выходе звена запаздывания присутствует сигнал, являющийся искомой реакцией на этом промежутке, полностью аналогичный сигналу на входе звена на предыдущем промежутке времени (для упрощения принято, что время внутри каждого промежутка находится в пределах от 0 до τ , т. е. отсчет времени производится заново).

$$Y(t)_2 = U(t)_1.$$

Рассогласование $\varepsilon(t)_2$ в этом случае равно разности управляющего воздействия на текущем промежутке времени и сигнала на входе звена запаздывания на предыдущем промежутке:

$$\varepsilon(t)_2 = Y^*(t)_2 - U(t)_1,$$

следовательно,

$$\begin{aligned} U(p)_2 &= \frac{U(\tau)_1}{p} + L[Y^*(t)_2 - U(t)_1] \times \\ &\times W(p) \longrightarrow U(t)_2. \end{aligned}$$

Аналогично определяется решение для последующих промежутков времени.

Заметим, что чем больше запаздывание относительно постоянных времени, тем больше информации о ходе переходного процесса содержится в решении для одного n -го промежутка, следовательно, уменьшается трудоемкость решения — значит, метод эффективен только для анализа систем с большим запаздыванием.

Рассмотренную методику можно использовать для аналитического прогнозирования поведения выходной координаты $Y(t)$ для каждого последующего промежутка времени длительностью τ . На каждом n -м промежутке можно вычислить функцию $Y(t)$, характерную для последующего промежутка $n+1$. Это выполняется в соответствии с алгоритмом (рис. 2).

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

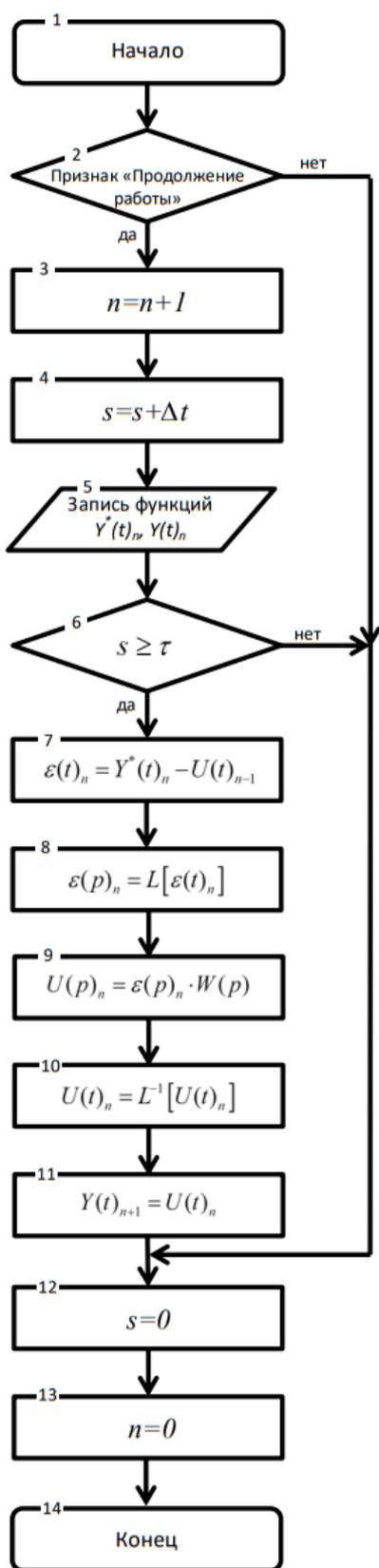


Рисунок 2 — Алгоритм прогнозирования выходной координаты

При наличии признака «Продолжение работы» (блок 2), инкремент номера промежутка n осуществляется в блоке 3. В этой же ветви алгоритма (блок 4) выполняется расчет времени s от начала текущего промежутка времени длительностью τ . Расчет выполняется с шагом квантования Δt . Также здесь выполняется считывание функций $Y^*(t)_n$ и $Y(t)_n$, характерных для текущего n -го промежутка времени (блок 5).

Когда переменная s достигнет величины τ , блок 6 разрешает расчет переходного процесса $U(\tau)_n$ на выходе инерционной части системы без запаздывания. Расчет выполняется в блоках 7–10 по методике, приведенной выше. В блоке 11 формируется выходная координата системы с учетом запаздывания $Y(t)_{n+1}$, характерная для следующего $n+1$ промежутка времени. Эту функцию можно использовать для коррекции управления системой. Учитывая, что данная методика не требует больших вычислительных ресурсов, такой алгоритм удобно использовать в качестве основы для создания быстродействующих систем автоматического управления.

В качестве примера рассмотрим определение переходного процесса на выходе системы с объектом

$$W(p) = \frac{e^{-\tau p}}{Tp}$$

при управляющем воздействии в виде единичной ступенчатой функции и нулевых начальных условиях.

Рассмотрим первый промежуток $[0; \tau]$. В соответствии с (1), рассогласование на данном промежутке равно управляющему воздействию:

$$\varepsilon(t)_1 = Y^*(t); \quad \varepsilon(p)_1 = \frac{1}{p}.$$

Изображение по Лапласу процесса на выходе разомкнутой части системы без запаздывания:

$$U(p)_1 = \varepsilon(p)_1 W(p) = \frac{1}{p^2}.$$

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Оригинал искомой функции получим, используя обратное преобразование Лапласа $U(t)_1 = t$.

Определим ординату переходного процесса в конце первого промежутка, необходимую для дальнейших расчетов $U(\tau)_1 = \tau$.

Рассматривая решение на втором промежутке $[\tau; 2\tau]$, для определения рассогласования используем уже известный процесс в системе на первом промежутке:

$$\varepsilon(t)_2 = Y^*(t)_2 - U(t)_1 = 1 - t;$$

$$\varepsilon(p)_2 = \frac{1}{p} - \frac{1}{p^2}.$$

В соответствии с (2), переходный процесс на втором промежутке

$$U(p)_2 = \frac{U(\tau)_1}{p} + \varepsilon(p)_2 W(p) = \frac{\tau}{p} + \frac{1}{p^2} - \frac{1}{p^3};$$

$$U(t)_2 = \tau + t - \frac{t^2}{2}; \quad U(\tau)_2 = 2\tau - \frac{\tau^2}{2}.$$

Аналогично определим переходный процесс на третьем промежутке:

$$\varepsilon(t)_3 = 1 - \tau - t + \frac{t^2}{2};$$

$$\varepsilon(p)_3 = \frac{1-\tau}{p} - \frac{1}{p^2} + \frac{1}{p^3};$$

$$U(p)_3 = \frac{U(\tau)_2}{p} + \varepsilon(p)_3 W(p) =$$

$$= \frac{2\tau - \frac{\tau^2}{2}}{p} + \frac{1-\tau}{p^2} + \frac{1}{p^3} - \frac{1}{p^4};$$

$$U(t)_3 = 2\tau - \frac{\tau^2}{2} + (1-\tau)t - \frac{t^2}{2} + \frac{t^3}{6}.$$

Таким образом, можно сравнительно просто получить решение для n-го промежутка. Для сравнения на рисунке 2 показаны переходные процессы на выходе данной системы, рассчитанные различными методами при $\tau=3$.

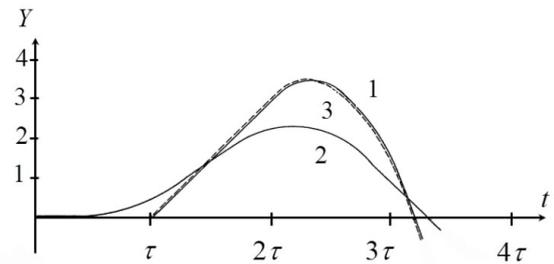


Рисунок 3 — Переходные процессы, рассчитанные различными методами

Здесь 1 — процесс, рассчитанный аналитически описанным выше методом; 2 — процесс в этой же системе, в которой звено запаздывания представлено рядом из пяти апериодических звеньев первого порядка [1]; 3 — процесс, рассчитанный путем цифрового моделирования в среде Matlab Simulink.

Полученные зависимости свидетельствуют об эффективности предложенной методики для анализа динамических систем с большим запаздыванием на конечном отрезке времени. Можно заметить, что чем больше величина запаздывания относительно постоянной времени, тем больше эффективность и меньше трудоемкость метода.

Аналогично можно вычислять переходные процессы в системах с различными объектами и входными воздействиями. Также можно учитывать возмущения. Возмущения должны быть приведены либо к выходу объекта, либо к выходу системы. Тогда их можно учесть по принципу суперпозиции на соответствующем отрезке времени.

Таким образом, для решения задачи расчета переходных процессов в системах с объектами, обладающими большим запаздыванием, целесообразно использовать модифицированный метод последовательного интегрирования. Этот метод позволяет рассчитать переходные процессы в САУ с получением точного решения при условии, что параметры системы являются постоянными во времени. Такой подход эффективен и менее трудоемок, чем другие

методы, при большом значении запаздывания. Использование предложенной методики может быть полезно для инженеров, занимающихся проектированием автоматических систем.

Выполненные исследования позволили сделать следующие **выводы**:

1. Установлено, что в системах с существенным запаздыванием, когда чистое запаздывание соизмеримо с постоянной времени объекта, определение реакции системы возможно без аппроксимации объекта непрерывной функцией.

2. На основе метода последовательного интегрирования разработана методика упрощенного расчета переходных процессов в замкнутой системе автоматического управления, обеспечивающая точное решение на промежутках времени, равных величине чистого запаздывания.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку алгоритмов оптимизации управления системами с существенным запаздыванием на основе рассмотренной методики расчета переходных процессов.

Список источников

1. Лукас В. А. Теория автоматического управления. М. : Недра, 1990. 416 с.
2. Курганов В. В., Цавнин А. В. Управление объектом с запаздыванием // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 2. С. 9–13.
3. Стопакевич А. А. Проектирование робастных регуляторов объектами с большим запаздыванием // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2016. Т. 1. № 2. С. 48–56.
4. Системы автоматического управления с запаздыванием / Ю. Ю. Громов [и др.]. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. 76 с.
5. Норкин С. Б. Дифференциальные уравнения второго порядка с запаздывающим аргументом. М. : Наука, 1965. 354 с.
6. Эльсгольц Л. Э., Норкин С. Б. Введение в теорию дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. М. : Наука, 1971. 296 с.

© Зотов В. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ГЭС ДонГТУ Корнеевым С. В., к.т.н., доц., зав. каф. общинженерных дисциплин СИПИМ ЛГУ им. В. Даля Сафоновым В. И.

Статья поступила в редакцию 28.05.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Зотов Вадим Алексеевич, канд. техн. наук, доцент каф. горных энергомеханических систем Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: vadim_zotov@mail.ru

Zotov V. A. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, e-mail: vadim_zotov@mail.ru)

ANAYTICAL CALCULATION OF PROCESSES IN SYSTEMS WITH LARGE DELAYS

The work is devoted to developing a methodology for computing transients in large-delayed dynamical systems. It is proposed to use the modified method of sequential integration for calculations. A presented computational algorithm can be used in the design of automated systems for mining production.

Key words: system, delay, parameters, characteristics, input action, output coordinate, time interval, quantization step.

References

1. Lukas V. A. *Automatic control theory [Teoriya avtomaticheskogo upravleniya]*. M. : Nedra, 1990. 416 p. (rus)
2. Kurganov V. V., Tsavnin A. V. *Delayed facility management [Upravlenie ob'ektom s zapazdyvaniem]. Automatics & Software Enginery*. 2015. No. 2. Pp. 9–13. (rus)
3. Stopakevich A. A. *Design of robust regulators by objects with large delays [Proektirovanie robustnyh regulyatorov ob'ektami s bol'shim zapazdyvaniem]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 1. No. 2. Pp. 48–56. (rus)
4. Gromov Yu. Yu. [et al.]. *Automatic control systems with delay [Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s zapazdyvaniem]*. Tambov : Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2007. 76 p. (rus)
5. Norkin S. B. *Second order differential equations with delayed argument [Differencial'nye uravneniya vtorogo poryadka s zapazdyvayushchim argumentum]*. M. : Nauka, 1965. 354 p. (rus)
6. El'sgol'c L. E., Norkin S. B. *Introduction to the theory of differential equations with deviating argument [Vvedenie v teoriyu differencial'nyh uravnenij s otklonyayushchimsya argumentom]*. M. : Nauka, 1971. 296 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zotov Vadim Alekseevich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Mining Energy-mechanical Systems
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: vadim_zotov@mail.ru

МЕТАЛУРГИЯ

METALLURGY

УДК 669.18.046.5

EDN: SLQLJS

¹Романчук А. Н., ^{1,*}Куберский С. В., ²Смолярчук Д. А., ²Вакуленко Е. Л., ¹Гангур Д. В.¹Донбасский государственный технический университет,²Южный горно-металлургический комплекс

*E-mail: Skuberskiy@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ОТСЕЧКИ КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА

Рассмотрено негативное влияние шлака, попадающего в сталеразливочный ковш при выпуске металла из конвертера на его качество и основные показатели технологического процесса в целом. Проведен сравнительный анализ эффективности отсечки первичного шлака при выпуске металла из конвертера с использованием тампонов CONE-PLAST и каолиновой ваты. Показано, что при использовании тампонов имеет место снижение угара раскислителей, расхода шлакообразующих, электроэнергии и длительности нагрева стали на агрегате «ковш-печь», что обеспечивает снижение себестоимости стали. Предложены рекомендации по усовершенствованию технологии выпуска стали из кислородного конвертера.

Ключевые слова: кислородный конвертер, выпуск металла, первичный шлак, летка, ковш, отсечка шлака, тампон, раскислители, усвоение.

Важнейшим элементом успешного проведения операций внепечной обработки является контроль и регулирование количества шлака, попадающего в ковш, при выпуске стали из кислородного конвертера (КК). Конечный плавильный шлак содержит значительное количество окислов железа, соединений фосфора и серы. Попадание такого шлака в ковш снижает эффективность десульфурации твердыми шлакообразующими смесями на выпуске из КК и затрудняет формирование рафинировочного шлака на установке «ковш-печь» (УКП), что негативно сказывается на эффективности внепечной обработки стали. При этом повышается угар раскислителей и легирующих, из шлака в металл восстанавливается фосфор, снижается степень десульфурации, увеличивается износ футеровки ковша и загрязнение металла неметаллическими включениями.

По данным работы [1] количество попадающего в ковш шлака во время выпуска металла из конвертера распределяется следующим образом: 15–20 % — в начале выпуска, 65–70 % — в конце, 15–20 % — во время возврата конвертера в рабочее положение.

Поэтому важной технологической операцией является обнаружение и отсечка шлака при переливе металла из КК в сталеразливочный ковш (С/К).

Отсечка шлака во время выпуска металла из КК в разливочный ковш имеет важное практическое значение, поскольку обеспечивает повышение срока службы футеровки ковшей, снижение степени рефосфорации, уменьшение угара ферросплавов и раскислителей, а также увеличение выхода годной стали.

В настоящее время применяются различные способы разделения металла и шлака при переливе из плавильных агрегатов и технологических емкостей [2–8].

В настоящее время самым простым способом отсечки конечного шлака в конвертерных цехах является его удержание путем быстрого перевода конвертера в вертикальное положение [9]. Однако этот способ в реальных производственных условиях не дает необходимой степени отсечки из-за меняющейся конфигурации сталевыпускного канала, который формирует выходящую струю. Оператор визуально контролирует момент появления шлака в струе металла и процесс истечения расплава.

Примером автоматических систем отсечки конечного шлака может служить «газодинамический» способ.

При обнаружении шлака в струе металла в выпускное отверстие снизу под большим давлением подается газ, очищающий выпускной канал и размазывающий шлак по внутренней поверхности отверстия конвертера [10].

Шлак удерживается в конвертере за счет динамического напора газа, вдуваемого через пробку в выпускное отверстие. Корпус пробки изготовлен из чугуна, в ее центре выполнено сопло-отверстие, через которое по сигналу подается сжатый воздух или азот. Размер пробки должен быть таким, чтобы между ее внешней поверхностью и внутренними стенками выпускного отверстия оставался кольцеобразный зазор, через который мог выходить воздух, подаваемый для удержания шлака в конвертере.

Способ газодинамической отсечки конечного шлака предполагает наличие термокамер или магниточувствительных сенсоров для раннего обнаружения частиц шлака в струе расплава, истекающего в разливочный ковш.

Следующий способ автоматической отсечки конечного шлака — это использование шибберного затвора, который устанавливают на летку снаружи конвертера и в момент появления частиц шлака в потоке выпускаемого металла этот затвор перекрывает канал конвертера огнеупорной плитой, которая перемещается с помощью электромеханического или гидравлического привода [11]. Сигналом к перекрытию выходного канала и запуску привода является команда, поступающая от радиационного пирометра.

В качестве альтернативы автоматическим методам отсечки конечного шлака на практике широкое распространение получили так называемые пассивные методы отсечки шлака, действие которых основано на проявлении определенных физических эффектов в критических условиях:

система типа «поплавок» (шар или конус) для отсечки шлака в конце слива стали.

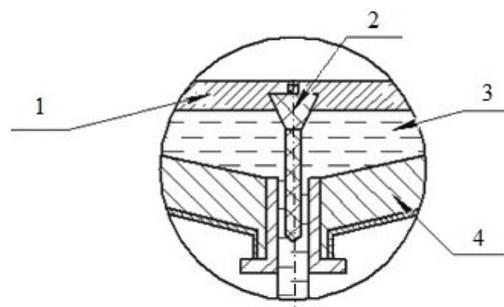
На рисунке 1 приведен способ отсечки конечного шлака с использованием элементов поплавкового типа, которые изготавливаются из огнеупорного материала и помещаются в ванну конвертера с помощью специальных устройств, блокирующих входное отверстие канала при подходе к нему слоя шлака на заключительной стадии выпуска металла.

К достоинствам этого способа можно отнести [12, 13]:

- все элементы находятся вне зоны воздействия высоких температур, а самым температурно-нагруженным элементом является штанга, вводимая в полость конвертера на время не более 30 с;
- отсутствие необходимости использования дорогих систем раннего обнаружения шлака в струе выпускаемой стали;
- удобное расположение устройства на рабочей площадке.

Отсечка конечного шлака с помощью отсечных элементов, вводимых в ванну конвертера, является наиболее распространенным способом, что вызвано его простотой и надежностью по сравнению с другими.

В настоящее время на металлургических предприятиях широкое распространение получила комплексная отсечка шлака на выпуске металла из конвертера, как первичного, так и конечного.



1 — шлак, 2 — отсечной элемент, 3 — металл, 4 — конвертер

Рисунок 1 — Способ отсечки шлака с использованием элементов поплавкового типа

Первичная отсечка шлака необходима для предотвращения загрязнения металла верхним скачиваемым шлаком из конвертера в начале выпуска стали.

Наиболее простым и относительно дешевым способом отсечки первичного шлака является установка в летке конвертера тампона на основе каолиновой ваты.

Перед началом плавки сталевар, с помощью манипулятора или металлического стержня, со стороны слива конвертера вводит до упора в выпускное отверстие тампон из каолиновой ваты, размер которого зависит от диаметра летки на данный момент. Под действием разности плотностей стали и шлака последний вытесняется из летки и остается в конвертере. Под напором жидкой стали тампон, в дальнейшем, выдавливается из летки.

Указанный способ отсечки первичного шлака имеет существенный недостаток, обусловленный конфигурацией сталевыпускного отверстия. Цилиндрическая форма отверстия не обеспечивает распиравания тампона, имеющего вес 400–500 г, и он плохо удерживается в летке.

Определенный интерес представляет способ отсечки первичного шлака на выпуске металла из конвертера с использованием стопора CONE-PLAST [14]. Указанный способ используется для предотвращения загрязнения металла верхним скачиваемым шлаком в начале выпуска стали.

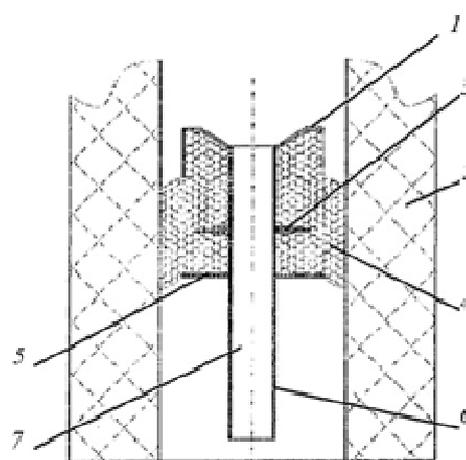
Способ позволяет свести к минимуму попадание шлака в летку при наклоне конвертера для выпуска стали независимо от характера износа и профиля летки.

Установка стопора для отсечки первичного шлака в летке КК показана на рисунке 2.

С помощью аппликатора пробка вставляется снаружи конвертера в горячую зону в конце летки и сжимается, при этом летка полностью закупоривается.

При повороте конвертера на выпуск плавки шлак с температурой плавления ~ 1350 °С не может расплавить стопор 1 и заполняет канал летки 2. При дальнейшем повороте конвертера шлак в течение 3–5 с

вытесняется металлом. Процесс вытеснения происходит благодаря большой разнице плотности металла и шлака. Плотность стали при температуре 1670–1700 °С — $7,7$ г/см³, плотность шлака при данной температуре колеблется от $3,15$ до $3,4$ г/см³. Таким образом, при контакте с металлом шлак сразу вытесняется из канала металлоразливочного отверстия. При занятии конвертером положения для слива плавки начинается истечение металла через проходной канал 7 стопора 1.



1 — стопор, 2 — летка, 3 — делитель, 4 — пробка, 5 — прижимной фланец, 6 — несущая трубка, 7 — проходной канал

Рисунок 2 — Установка стопора CONE-PLAST для отсечки первичного шлака в летке КК

Через 3–5 с внутренняя трубчатая основа стопора 1 расплавляется, и с металлом начинает контактировать непосредственно огнеупорный материал пробки 4. Сливаемый металл, принимая из-за гравитации вращение по часовой стрелке, оказывает на материал пробки стопора не только термическое, но и активное механическое воздействие. При вхождении в полость выгоревшего делителя 3, поток металла разделяется, оказывая дополнительное механическое воздействие на нижнюю часть пробки 4 стопора 1. Благодаря пористой сотовой структуре и большому количеству

газовых каналов, являющихся в данном случае концентраторами напряжений, происходит активное разрушение огнеупорного материала стопора *1* с отделением не менее 25–30 % массы изделия в течение первых 7–10 с. Далее под воздействием термомеханической нагрузки происходит дальнейшее разрушение пробки *4* с потерей массы до 50–60 %. По достижении определенной величины пробка *4* стопора *1* более не может удерживать силу ферростатического давления и вымывается из канала летки под воздействием потока металла, оставляя летку (выпускное отверстие) чистой. Полный цикл работы стопора *1* составляет 15–25 с.

Цель работы заключалась в проведении сравнительных исследований для оценки эффективности отсечки первичного шлака на выпуске металла из конвертера с использованием тампонов CONE-PLAST и каолиновой ваты.

Объект исследования — технология выпуска стали из конвертера.

Предмет исследования — эффективность отсечки первичного шлака с использованием тампонов CONE-PLAST (тампонов) и каолиновой ваты.

Задачи исследования:

– проанализировать эффективность отсечки первичного шлака с использованием тампонов;

– оценить влияние первичного шлака, попадающего в сталеразливочный ковш (С/К) при различных способах его отсечки, на угар ферросплавов;

– определить целесообразность дальнейшего использования отсечки первичного шлака на выпуске металла из конвертера с использованием тампонов.

Исследования проводились в кислородно-конвертерном цехе металлургического комбината.

Сталь выплавляли в кислородном конвертере комбинированного дутья. Во время выпуска металла из конвертера производили первичную отсечку шлака при помощи каолиновой ваты или тампонов из пластичных

огнеупорных масс марки CONE-PLAST и отсечку конечного конвертерного шлака с помощью автоматизированной системы отсечки шлака. Система основана на измерении инфракрасного излучения от металла и шлака. При появлении шлака система сигнализирует об этом оператору, одновременно автоматически включается шлаковый стопор. Принцип работы системы заключается в удерживании шлака путем вдувания сжатого азота через сопло в выпускное отверстие.

Раскисление металла и шлака производили на выпуске из КК и на установке «ковш-печь» (УКП). Технология раскисления металла опытных и сравнительных плавов была одинаковой.

В качестве раскислителей металла и шлака на выпуске из КК применялись материалы: Al чушки, алюминиевые брикеты АБ-80 (содержат до 80 % Al), ФМн78, ФМн88, ФС75, ФС65, MnC, карбид кальция — CaC₂. Карбид кальция вводили в ковш перед ферросплавами. При наполнении ковша металлом от 1/5 до 1/4 его высоты (~60 т) вводили основные ферросплавы в последовательности, зависящей от сродства к кислороду MnC, ФМн, ФС, Al. Ввод шлакообразующих материалов (извести и алюмосодержащих материалов или плавикового шпата) осуществляли после отдачи всех раскисляющих материалов. Чушковый алюминий вводили на дно ковша, а алюминиевые брикеты — под струю во время выпуска стали из конвертера.

В качестве раскислителей металла и шлака на УКП применялись следующие материалы: Al чушки, АБ-80, Al пров., ФМн78, ФМн88, ФС65, MnC.

Для анализа были использованы статистические данные 568 плавов с использованием тампонов (далее по тексту — опытные), из них:

– 257 плавов бескремнистых марок стали с содержанием Mn ≤ 0,7% (1 оп.);

– 28 плавов бескремнистых марок стали с содержанием Mn > 0,7 % (2 оп.);

– 201 плавка низколегированных марок стали с содержанием Mn > 0,8 % (3 оп.);

МЕТАЛЛУРГИЯ

– 82 плавки спокойных марок стали с содержанием $Mn \leq 0,8 \%$ (4 оп.).

Для сравнения результатов опытных плавков были использованы статистические данные 2398 плавков (далее по тексту — сравнительные) с применением каолиновой ваты для отсечки первичного шлака на выпуске металла из конвертера, из них:

- 907 плавков бескремнистых марок стали с содержанием $Mn \leq 0,7 \%$ (1 сравн.);
- 148 плавков бескремнистых марок стали с содержанием $Mn > 0,7 \%$ (2 сравн.);
- 911 плавков низколегированных марок стали с содержанием $Mn > 0,8 \%$ (3 сравн.);
- 432 плавки спокойных марок стали с содержанием $Mn \leq 0,8 \%$ (4 сравн.).

Как было отмечено выше, попадающий в С/К конвертерный шлак оказывает большое влияние на угар основных элементов, входящих в состав материалов, используемых для раскисления стали. В результате анализа

опытных и сравнительных плавков был установлен средний расход раскислителей на выпуске из КК и на УКП для различных групп марок стали. Полученные результаты систематизированы в таблицах 1 и 2.

Предварительное раскисление стали в С/К при использовании тампонов (табл. 1) характеризуется несколько большим расходом чушкового алюминия и алюминиевых брикетов, а также ФС75 и МнС. Расход ФС65 и карбида кальция снизился. При обработке стали на УКП с использованием новой технологии отсечки конвертерного шлака расход всех раскислителей снизился (табл. 2). Кроме того, уменьшился расход электроэнергии на 0,5–1,9 кВт·ч/т (среднее 1,05 кВт·ч/т) и время нагрева стали на 0,75 мин (5,5 %), что обеспечивает увеличение производительности УКП (более 1 %) и снижение доли условно постоянных затрат в себестоимости продукции.

Таблица 1

Средний расход материалов (кг/т) для раскисления металла и шлака на выпуске из КК

Группа стали	Al чуш.	АБ-80	ФМн78	ФМн88	ФС75	ФС65	МнС	CaC ₂
1 оп.	0,18	0,61	5,37	7,02	-	-	-	0,17
1 сравн.	0,28	0,23	4,99	6,26	-	-	0,09	0,25
2 оп.	0,24	-	2,97	0,16	-	-	0,18	0,37
2 сравн.	0,22	0,02	3,41	0,16	-	-	0,20	0,41
3 оп.	0,24	-	1,74	0,03	0,61	1,73	15,44	0,40
3 сравн.	0,15	-	2,19	0,01	0,33	1,83	14,65	0,46
4 оп.	0,21	0,01	-	0,02	0,42	2,15	7,03	0,53
4 сравн.	0,11	0,01	0,36	-	0,49	2,60	6,52	0,59

Таблица 2

Средний расход материалов (кг/т) для раскисления металла и шлака на УКП

Группа стали	Al чуш.	АБ-80	Al, пров.	ФМн78	ФМн88	ФС65	МнС
1 оп.	2,03	0,03	0,78	0,84	0,05	-	-
1 сравн.	2,08	0,01	0,80	1,03	0,09	-	-
2 оп.	1,97	0,01	0,59	0,46	-	-	-
2 сравн.	1,95	0,02	0,60	0,43	0,01	-	-
3 оп.	0,51	0,03	0,50	0,04	-	0,85	2,09
3 сравн.	0,53	0,05	0,51	0,04	0,01	0,87	2,1
4 оп.	0,34	0,05	0,52	-	-	0,92	1,02
4 сравн.	0,34	0,09	0,54	0,01	-	0,96	0,98

Это обусловлено более эффективной отсечкой первичного конвертерного шлака, а следовательно, снижением окисленности ковшевого шлака, расхода шлакообразующих, необходимых для получения шлака с требуемыми физико-химическими свойствами, общего количества шлака и улучшением теплового баланса процесса внепечной обработки. Косвенным подтверждением более эффективной отсечки с помощью тампонов является и меньшее в сравнении с технологией, предусматривающей использование каолиновой ваты, содержание в ковшевом шлаке УКП оксидов FeO и MnO на 0,04–0,10 % и 0,04–0,19 % соответственно.

Для 2–4-й групп марок сталей отмечено более высокое содержание глинозема в шлаке УКП на 0,72–1,67 %, что обеспечило снижение расхода плавикового шпата на 0,02 кг/т.

Средние значения сквозного усвоения Mn, Si, Al из ферросплавов и Al из проволоки на опытных и сравнительных плавках были установлены расчетным путем и приведены в таблице 3.

Анализ данных таблицы 3 свидетельствует о том, что, несмотря на более высокую температуру на повалке (на 3–10 °С), среднее сквозное усвоение Mn при использовании тампонов увеличилось на 1–3 % для различных групп марок стали, а Si — на 1 %. Наибольшая эффективность такого способа отсечки первичного шлака обусловлена значительным ростом усвоения

алюминия из проволоки (на 3–7 %), являющейся наиболее дорогим материалом из использованных для раскисления.

Все это в первую очередь объясняется более эффективной отсечкой конвертерного шлака. При визуальном наблюдении за сливом металла из КК на опытных плавках попадание первичного шлака в ковш не наблюдалось.

Для определения экономической эффективности применения тампонов принимался фактический расход алюминиевых чушек, раскисляющих брикетов, плавикового шпата и карбида кальция. Расход ферросплавов, содержащих Mn и Si пересчитывался на основании сквозного усвоения элементов для равных условий: одинаковое содержание Mn в металле на повалке конвертера (усредненное фактическое) и одинаковый химический состав готовой стали (усредненный фактический).

Средние затраты на основные материалы (раскислители, карбид кальция, плавиковый шпат) при использовании тампонов снизились примерно на 6 руб/т или 1,2 %, что вполне компенсирует их цену (4,5–5 руб/т). Причем наибольшее снижение (13,65 руб/т или 2,9 %) было достигнуто при производстве спокойных сталей, характеризующихся повышенным расходом раскислителей в сравнении с другими рассмотренными группами. С учетом снижения расхода электроэнергии (2–8 руб/т) и времени нагрева на УКП эффективность использования тампонов будет еще выше.

Таблица 3

Средние значения сквозного усвоения основных элементов ферросплавов и Al из проволоки

Группа стали	Mn, %	Si, %	Al, %	Al пров., %
1 оп.	95	—	14	66
1 сравн.	94	—	14	59
2 оп.	98	—	15	68,5
2 сравн.	97	—	15	65
3 оп.	98	65	28	66
3 сравн.	98	66	28	62
4 оп.	96	56	31	60
4 сравн.	93	57	31	57

С точки зрения технологических особенностей использования тампонов были выявлены следующие недостатки, требующие решения для дальнейшей реализации технологии:

– в условиях кампании конвертера наблюдается разгар сливного отверстия, поэтому для серийного использования отсечки тампонами необходимо при поставке предусмотреть их различный размерный ряд, включающий 25 % тампонов диаметром 130 мм, 50 % — диаметром 140 мм и 25 % — диаметром 150 мм;

– в соответствии с условиями участка кислородных конвертеров для эффективной установки тампонов необходимо увеличение длины манипулятора до 4,5–5,0 м.

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Проанализированы различные технологии отсечки первичного конвертерного шлака и показана высокая эффективность использования тампонов CONE-PLAST для решения этой актуальной технологической проблемы.

2. В условиях действующего производства проведен сравнительный анализ эффективности использования тампонов CONE-PLAST и каолиновой ваты, который показал, что, несмотря на незначительное увеличение расхода чушкового

алюминия и алюминиевых брикетов при предварительном раскислении стали в ковше, использование тампонов для отсечки первичного шлака практически исключает попадание его в ковш при выпуске и обеспечивает значительное увеличение сквозного усвоения алюминия, марганца и кремния, а также сокращение расхода алюминиевой проволоки, марганцевых и кремнистых ферросплавов при работе на УСП. Кроме того, отмечено снижение расхода электроэнергии и длительности нагрева стали на УСП.

3. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения тампонов CONE-PLAST для отсечки первичного конвертерного шлака.

4. Для серийной реализации данной технологии отсечки необходимо обеспечить длину манипулятора для их установки 4,5–5,0 м и обязательно предусматривать в каждой партии поставку тампонов диаметром 130, 140 и 150 мм, что обусловлено разгаром сливного отверстия в процессе эксплуатации конвертера.

5. В ходе дальнейших исследований предполагается проанализировать эффективность тампонов CONE-PLAST и особенности их работы при различных размерах сливного отверстия в начале, середине и конце кампании кислородного конвертера.

Список источников

1. Энкнер Б., Пастер А., Швельбергер И. Новая стопорная система для шлака кислородно-конвертерного производства стали // МРТ. 2002. С. 12–21.
2. Устройство для отсечки первичного конвертерного шлака при выгрузке плавки через отводное отверстие конвертера : пат. 2739471 Рос. Федерация. № 2018104364 ; заявл. 05.02.18 ; опубл. 24.12.20, Бюл. 36. 7 с.
3. Узел блокировки устройства для разделения расплавов : пат. 34480 Республика Казахстан. № 2019/0068.1 ; заявл. 29.01.19 ; опубл. 30.07.20, Бюл. 30. 3 с.
4. Разработка и внедрение устройства для разделения металла и шлака в период наполнения промежуточного ковша / Ф. Б. Жаутиков [и др.] // Металлург. 2019. № 7. С. 12–14.
5. Method of plugging tapholes in phosphorus furnaces : Pat. 4030709 USA. No. 663,845 ; Submitted 04.03.1976 ; Published 21.06.1977.
6. Пробка конвертерного шлака : пат. 2795226 КНР. № 200520108497.5 ; заявл. 27.05.05. опубл. 12.07.06.
7. Заглушка для стального резьбового отверстия в конвертере : пат. 2002327210 Япония. № 2001131906 ; заявл. 27.04.01; опубл. 15.11.02.

8. Пробка для предотвращения вытекания конвертерного шлака : пат. 20030031239 Республика Корея. № KR20010063030 ; заявл. 12.10.01 ; опубл. 21.04.03.

9. Штилькеринг Б. Эффективность методов отсечки шлака при сливе металла из конвертера // *Металлургия и горнорудная промышленность*. 2002. № 1. С. 38–41.

10. Гичёв Ю. А., Перцевой В. А. Моделирование газодинамической отсечки шлака, обеспечивающей энерго- и ресурсосбережение при выпуске плавки // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 4. С. 84–87.

11. Бесилаков В. Выпуск плавки с помощью затвора выпускного отверстия ТАР 120 при производстве чистой стали / У. Греф [и др.] // *Сталь*. 2005. № 7. С. 51–54.

12. Бедарев С. А. Обоснование параметров и усовершенствование системы отсечки конвертерного шлака элементами поплавокотного типа при выпуске стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Донецк : ДонНТУ, 2011. 22 с.

13. Еронько С. П., Смирнов А. Н., Кукуй Д. П. Разработка эффективных схем отсечки шлака при сливе металла из конвертера // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003. № 8. С. 33–37.

14. Стопор для отсечки первичного конвертерного шлака, аппликатор для посадки стопора в летку конвертера, система отсечки первичного конвертерного шлака, способ отсечки первичного конвертерного шлака : пат. 2415950 Рос. Федерация. № 2009140657/02 ; заявл. 02.11.10 ; опубл. 10.04.11. Бюл. 23. 15 с.

© Романчук А. Н., Куберский С. В., Гангур Д. В.

© Смолярчук Д. А., Вакуленко Е. Л.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Должиковым В. В.,
начальником патентного отдела ЮГМК Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 25.06.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Романчук Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,

Куберский Сергей Владимирович, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Смолярчук Дмитрий Анатольевич, начальник кислородно-конвертерного цеха
Южный металлургический комплекс,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Вакуленко Евгений Леонидович, зам. начальника кислородно-конвертерного цеха
Южный металлургический комплекс,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Гангур Денис Владимирович, магистрант каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Romanchuk A. N., *Kuberskiy S. V. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: Skuberskiy@yandex.ru), **Smolyarchuk D. A., Vakulenko E. L.** (Southern Mining and Metallurgical Enterprise, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia), **Gangur D. V.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia)

STUDYING THE EFFICIENCY OF CONVERTER SLAG CUT-OFF METHODS

The negative influence of slag entering the steel ladle during the metal release from the converter on its quality and the main indicators of the technological process as a whole is considered. A comparative analysis of the efficiency of first slag cut-off during metal release from the converter using "CONE-PLAST" plugs and kaolin wool has been carried out. It is shown that when using plugs there is a reduction of deoxidizer carbonization, slag-forming agents' consumption, electric power and duration of steel heating at the ladle-furnace unit, which provides reduction of steel production cost. Recommendations are made to improve the steelmaking technology of the oxygen converter.

Key words: oxygen converter, metal tapping, first slag, notch, ladle, slag cut-off, plug, desoxidant, recovery.

References

1. Enkner B., Paster A., Shvel'berger I. New stopper system for oxygen steelmaking slag [Novaya stopornaya sistema dlya shlaka kislorodno-konverternogo proizvodstva stali]. MRT. 2002. Pp. 12–21. (rus)
2. Device for cutting off the first converter slag when discharging the melt through the converter discharge opening. Patent 2739471 RF, no. 2018104364. Submitted 05.02.18. Published 24.12.20. Bulletin 36. 7 p.
3. Melt separator interlock assembly. Patent 34480 RK, no. 2019/0068.1. Submitted 29.01.19. Published 30.07.20. Bulletin 30. 3 p.
4. Zhautikov F. B. (et al.). Development and implementation of a device for the separation of metal and slag during the filling of the intermediate ladle [Razrabotka i vnedrenie ustrojstva dlya razdeleniya metalla i shlaka v period napolneniya promezhutochnogo kovsha]. Metallurgist. 2019. No. 7. Pp. 12–14. (rus)
5. Method of plugging tapholes in phosphorus furnaces. Patent 4030709 USA, no. 663,845. Submitted 04.03.1976. Published 21.06.1977.
6. Converter Slag Plug. Patent 2795226 CHN, no. 200520108497.5. Submitted 27.05.05. Published 12.07.06.
7. Plug for steel threaded hole in converter. Patent 2002327210 JPN, no. 2001131906. Submitted 27.04.01. Published 15.11.02.
8. Plug for preventing converter slag leakage. Patent 20030031239 SK, no. KR20010063030. Submitted 12.10.01. Published 21.04.03.
9. Shtil'kering B. Efficiency of slag cut-off methods when draining metal from the converter [Effektivnost' metodov otsechki shlaka pri slive metalla iz konvertera]. Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost. 2002. No. 1. Pp. 38–41. (rus)
10. Gichev Yu. A., Pertsevoi V. A. Modeling of gas-dynamic slag cut-off providing energy and resource saving at melting release [Modelirovanie gazodinamicheskoy otsechki shlaka, obespechivayushchej energo- i resursosberezhenie pri vypuske plavki]. Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost. 2007. No. 4. Pp. 84–87. (rus)
11. Gref U. (et al.). Slag-free melting release with the TAP 120 outlet gate in clean steel production [Besshlakovyj vypusk plavki s pomoshch'yu zatvora vypusknogo otverstiya TAR 120 pri proizvodstve chistoj stali]. Steel. 2005. No. 7. Pp. 51–54. (rus)
12. Bedarev S. A. Justification of parameters and improvement of BOF slag cut-off system by float-type elements during steel production: synopsis of a thesis ... of PhD in Eng. [Obosnovanie parametrov i usovershenstvovanie sistemy otsechki konverternogo shlaka elementami poplavkovogo tipa pri vypuske stali: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk]. Doneck : DonNTU, 2011. 22 p.
13. Eron'ko S. P., Smirnov A. N., Kukuj D. P. Development of effective slag separation schemes during metal discharge from the converter [Razrabotka effektivnyh skhem otsechki shlaka pri slive metalla iz konvertera]. Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost. 2003. No. 8. Pp. 33–37. (rus)

14. First converter slag cut-off plug, applicator for inserting the plug into the converter fly, first converter slag cut-off system, first converter slag cut-off method. Patent 2415950 RF. No. 2009140657/02. Submitted 02.11.10. Published 10.04.11. Bulletin 23. 15 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanchuk Aleksandr Nikolaievich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Kuberskiy Sergey Vladimirovich, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Smolyarchuk Dmitry Anatolievich, chief of the oxygen converter shop
Southern Mining and Metallurgical Enterprise,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Vakulenko Eugeny Leonidovich, deputy chief of the oxygen converter shop
Southern Mining and Metallurgical Enterprise,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Gangur Denis Vladimirovich, candidate for a master's degree of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

*Должиков В. В., *Федотов О. В., Скубыря Н. А.
Донбасский государственный технический университет
E-mail: fovit2012@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ И АГЛОМЕРАТА

Проведены статистические исследования результатов работы аглофабрики металлургического комбината с целью обнаружения величины колебаний химического состава аглошихты и агломерата. Обнаружены существенные отклонения от рекомендуемых значений интервалов колебания в содержании железа и основности агломерата. Показано, что установленные колебания химического состава агломерата могут быть изменены при уменьшении колебаний содержания железа в составе шихты.

Ключевые слова: агломерация железных руд, агломерат, агломерационная шихта, качество агломерата, колебания химического состава агломерационной шихты, колебания химического состава агломерата.

Основными факторами, формирующими показатели качества в агломерационном производстве и влияющими на технико-экономические показатели доменного процесса, являются:

– крупность кусков агломерата (ограниченная верхним и нижним пределами) или массовая доля в нем мелочи;

– степень колеблемости агломерата по физико-химическим свойствам, определяемая величиной стандартного отклонения.

Для определения влияния этих факторов на удельный массовый расход кокса и удельную производительность доменной печи предложены линейные и нелинейные регрессионные модели [1].

В. И. Кармазин [2] отмечает, что при колебаниях содержания железа в агломерате больше 1 % резко падает производительность и экономичность работы доменной печи в связи с увеличением расхода кокса. Автором показано в виде нелинейной зависимости влияние колебаний содержания железа в агломерате на производительность доменной печи и в виде линейной зависимости влияние колебаний содержания железа в агломерате на удельный расход кокса.

При работе на усредненном железорудном сырье производительность доменных печей увеличивается на 4–5 %, расход до-

менного кокса снижается на 0,5–4,0 %, расход железорудного материала — на 1,0–1,5 % и флюса — на 6–8 %.

В работе [3] показано, что уменьшение колеблемости содержания железа в агломерате на 0,5 % снижает удельный расход кокса на 1,08 % и повышает производительность печей на 1,5 %.

По данным других исследователей [4, 5] уменьшение отклонений от среднего содержания железа в шихте на 0,5–1,0 % обеспечивает увеличение производительности доменной печи на 2,8 %, снижение расхода кокса на 2,2 %, выхода шлака — на 2,8 %, колебаний содержания кремния в чугуне — на 39 %.

Следует отметить, что техническими требованиями и технологическими инструкциями на металлургических предприятиях СССР регламентировались основные показатели качества агломерата, среди которых были и допустимые колебания химического состава.

Основным способом уменьшения колебаний химического состава агломерата является усреднение химического состава агломерационной шихты. Под усреднением сырья подразумевается выравнивание его качественных показателей во времени. Постоянство свойств компонентов шихты

и степень усреднения в различных технологических операциях можно оценивать посредством количественной обработки анализов разовых проб методами математической статистики.

Целью настоящей работы явилось изучение колебаний химических составов аглошихты и агломерата металлургического предприятия и разработка предложений по улучшению качества агломерата.

Объект исследования — показатели качества агломерата.

Предмет исследования — результаты химических анализов агломерационной шихты и агломерата.

Задачи исследования:

- получить статистические оценки усреднения агломерационной шихты и агломерата;
- предложить мероприятия по уменьшению размаха колебаний химического состава агломерата.

Для анализа применяли статистические характеристики, наиболее часто используемые для описания случайных процессов, к которым относится и усреднение. Разность между максимальным и минимальным значениями выборки называется *вариационным размахом*, который определяется по формуле

$$R = x_{\max} - x_{\min}, \quad (1)$$

где x_{\max} и x_{\min} — соответственно максимальное и минимальное значения показателя изучаемого процесса, например, содержания железа в агломерационной шихте.

Данная характеристика очень важна, поскольку устанавливает интервал колебаний, однако является недостаточной для оценки степени колеблемости, так как величина показателя вариации зависит от двух крайних показателей.

Более значимым для оценки параметров усредняемого материала является значение среднего арифметического

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где x_i — содержание компонента в разовой пробе, %; n — количество разовых проб, шт.

Среднее арифметическое за разные периоды времени также не дает полной оценки рассматриваемого процесса, так как по своему статистическому содержанию представляет собой характеристику, которую имела бы каждая единица совокупности, если бы общий итог процесса был распределен равномерно между всеми единицами совокупности. Эта характеристика используется как средство для понимания случайных отклонений изучаемого признака, что позволяет выявить основные тенденции и закономерности изменения изучаемого фактора.

Для определения степени равномерности (или неравномерности) качества материала чаще используется среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3)$$

Использование данного критерия для оценки качества усреднения обусловлено следующими соображениями. При большом количестве анализов шихты или ее компонентов число случайных отклонений в большую или меньшую сторону от \bar{x} какого-либо компонента в общем случае одинаково и подчиняется закону нормального распределения.

Кривая распределения, в зависимости от величины признака σ , может иметь разную кривизну. Таким образом, колеблемость содержания компонента следует оценивать не по абсолютному, а по среднеквадратичному отклонению. Для практических целей обычно принимают допустимое отклонение, равное 2σ .

Техническими условиями и стандартами регламентируются пределы колебаний, например, качества аглоруды или шихты по содержанию железа, основности и содержанию железа в агломерате и др. Среднеквадратичные отклонения σ этих показателей могут быть найдены из выражения

МЕТАЛЛУРГИЯ

$$\sigma = \frac{\bar{d}}{t}, \quad (4)$$

где \bar{d} — допустимые пределы отклонений, %; t — коэффициент, найденный по таблице распределения Стьюдента для выборок большого размера (табл. 1).

Так, если допустимые отклонения по железу в аглошихте $\pm 0,5$ с вероятностью 95,5 % случаев, то $t \approx 2$, а допустимая величина σ составляет 0,25.

Для исследований были выбраны результаты работы агломерационной фабрики одного из металлургических комбинатов. На предприятии спекали офлюсованный агломерат. Шихта состояла из концентратов и агломерационной руды. В анализ включили показатели химического состава по пробам, взятым через каждые 4 часа работы (около 1300 проб). Расчеты выполнены с использованием программы Statistica.

Статистические характеристики основных показателей состава аглошихты и агломерата за весь период приведены в таблице 2. Обозначения в таблице соответствуют принятым в программе: кол-во — количество обработанных значений показателя; среднее — среднее значение показателя; Minimum, Maximum — соответственно минимальное и максимальное значения показателя; станд. откл. — выборочная оценка стандартного отклонения показателя от среднего.

Таблица 1

Величины коэффициента вероятности

t	Вероятность, %
1,65	90,1
2,00	95,5
2,50	98,8
3,00	99,7

По исследуемым факторам оценивалось соответствие выборочных распределений нормальному. Полученные гистограммы распределений содержания железа показаны на рисунках 1 и 2.

Проверка распределений SiO_{2g} , MgO_g , Fe , CaO показала соответствие распределений нормальному закону. Распределения остальных показателей можно отнести к нормальному закону с меньшим уровнем достоверности. Отклонения от закона нормального распределения могут быть вызваны несколькими причинами.

Было выдвинуто предположение о том, что весь исследуемый период состоял из отдельных периодов с существенными различиями в средних значениях и стандартных отклонениях показателя из-за нестабильных поставок. При этом распределение будет отличаться от нормального тем сильнее, чем больше различия в средних и меньше в стандартных отклонениях показателя в отдельные периоды.

Таблица 2

Статистические характеристики основных химических компонентов шихты и агломерата за весь период

Показатель		Характеристики			
		среднее	minimum	maximum	станд. откл.
шихта*	Fe_g	61,43	54,30	66,10	1,85
	SiO_{2g}	5,75	1,50	9,20	1,25
	CaO_g	2,86	0,85	7,70	1,34
	MgO_g	2,18	0,28	5,98	0,78
	B_{2g}	0,54	0,13	3,80	0,36
агломерат	Fe	55,50	46,40	62,18	2,38
	SiO_2	7,13	2,67	42,30	2,52
	CaO	12,00	5,15	24,75	3,03
	MgO	3,10	1,16	8,60	1,98
	B_2	2,11	0,75	4,54	0,64

*Индекс g у показателя указывает на значение в аглошихте, при отсутствии индекса показатель относится к агломерату; B_2 — основность CaO/SiO_2 .

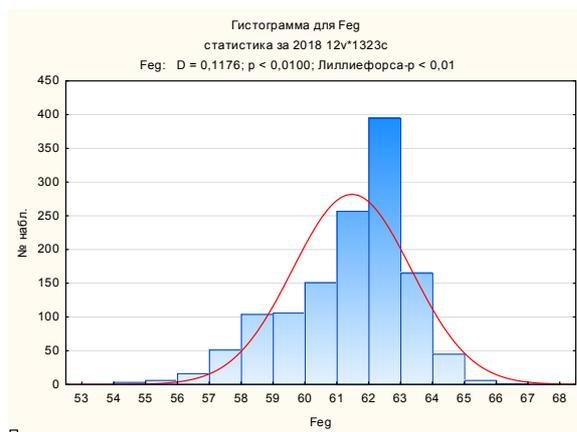


Рисунок 1 — Гистограмма распределения Fe_g в агломерационной шихте

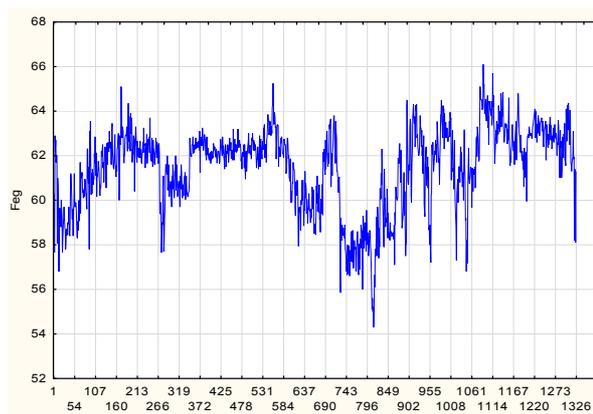


Рисунок 3 — Изменения содержания Fe в шихте, % (по оси абсцисс «Номера проб»)

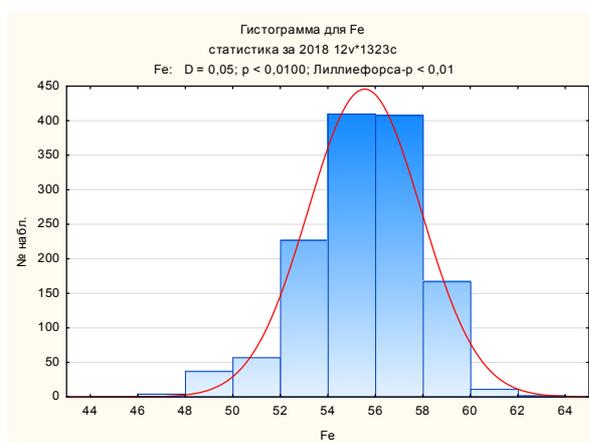


Рисунок 2 — Гистограмма распределения Fe в агломерате

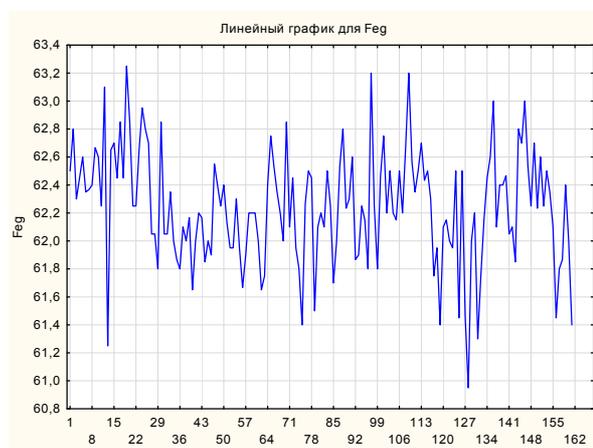


Рисунок 4 — Изменения содержания Fe в шихте (наблюдения 360–520)

Для проверки этого предположения был построен график последовательного изменения содержания Fe в шихте в течение всего периода (рис. 3).

Анализируя данные, представленные на рисунке 3, можно выделить периоды с разными по величине колебаниями Fe в шихте:

- с достаточно малыми колебаниями — период наблюдений 360–520, всего 161 наблюдение (рис. 4);

- со средними колебаниями — период наблюдений 1–213, всего 213 наблюдений (рис. 5);

- с существенно большими колебаниями — период наблюдений 820–1061, всего 235 наблюдений (рис. 6).

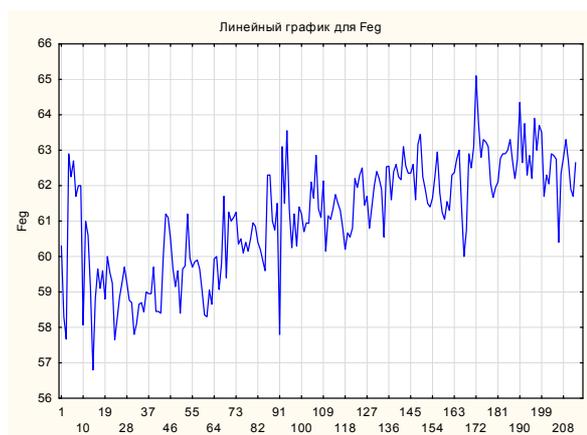


Рисунок 5 — Изменения содержания Fe в шихте (наблюдения 1–213)

МЕТАЛЛУРГИЯ

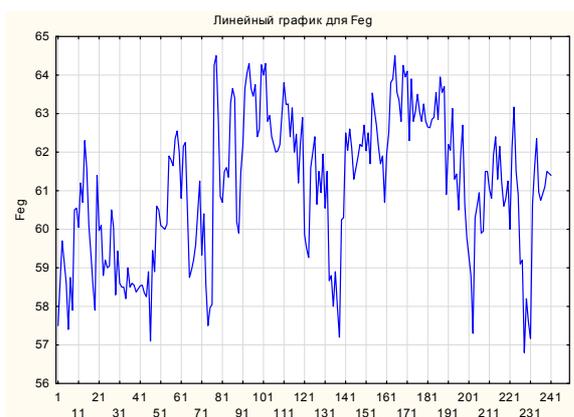


Рисунок 6 — Изменения содержания Fe в шихте (наблюдения 820–1061)

Статистические характеристики показателей за эти периоды представлены в таблице 3.

В настоящее время техническими условиями и стандартами рекомендуются пределы колебаний качества агломерационной руды или шихты по содержанию железа $\pm 0,5\%$, основности агломерата $\pm 0,05$, содержания железа в агломерате $\pm 0,3\%$.

Анализ колебаний содержания железа в шихте показал, что наименьший интервал колебаний (1-й период), в который попадает 95 % проб, составляет $0,41\% \cdot 2 = \pm 0,82\%$. Для содержания железа в агломерате такой интервал (также соответствует 1-му периоду) составляет $1,09\% \cdot 2 = \pm 2,18\%$.

В 1-м периоде по основности B_2 агломерата был достигнут наименьший интервал колебаний $0,31\% \cdot 2 = \pm 0,62\%$.

В остальные периоды интервалы колебаний были существенно (в несколько раз) выше.

Связь между колебаниями компонентов шихты и агломерата можно установить, используя статистические методы. Для оценки тесноты линейной связи между переменными обычно используются значения коэффициента корреляции. По данным за весь период были рассчитаны парные коэффициенты корреляции основных показателей химического состава агломерационной шихты и агломерата (табл. 4).

Таблица 3

Статистические характеристики показателей по периодам

Показатель	Период	Наблюдений	Среднее значение	Стандартное отклонение
Fe _g	1	161	62,24	0,41
	2	213	61,12	1,59
	3	235	61,12	1,88
SiO _{2g}	1	157	6,78	0,49
	2	213	6,00	1,64
	3	235	5,48	1,35
CaO _g	1	161	1,40	0,23
	2	213	2,44	0,79
	3	235	3,92	1,35
MgO _g	1	161	1,77	0,41
	2	103	2,08	0,49
	3	146	2,34	1,13
B _{2g}	1	161	0,21	0,04
	2	213	0,42	0,12
	3	235	0,84	0,58
Fe	1	161	55,95	1,09
	2	213	56,27	1,86
	3	241	54,63	2,35
SiO ₂	1	161	6,64	0,42
	2	212	10,86	3,71
	3	241	5,89	1,02

МЕТАЛЛУРГИЯ

Продолжение таблицы 3

Показатель	Период	Наблюдений	Среднее значение	Стандартное отклонение
CaO	1	161	11,35	1,44
	2	213	10,27	2,19
	3	241	13,38	3,02
MgO	1	161	1,79	0,28
	2	213	6,92	1,07
	3	241	2,21	0,69
B ₂	1	161	1,73	0,31
	2	213	1,96	0,51
	3	241	2,39	0,81
FeO	1	161	10,39	1,69
	2	213	1,48	0,16
	3	241	10,17	1,65

Таблица 4

Парные коэффициенты корреляции основных показателей химического состава агломерационной шихты и агломерата (жирным выделены значимые коэффициенты)

Показатели химического состава аглошихты, %	Показатели химического состава агломерата, %					
	Fe	SiO ₂	CaO	MgO	B ₂	FeO
Fe _g	0,58	0,16	-0,53	-0,07	-0,41	-0,02
SiO _{2g}	-0,16	-0,13	0,15	-0,49	-0,46	0,40
CaO _g	-0,42	-0,34	0,43	-0,03	0,41	0,16
MgO _g	-0,57	-0,05	0,51	0,33	0,67	-0,22
B _{2g}	-0,27	-0,30	0,29	0,11	0,53	0,04

Связь между содержанием железа в шихте и агломерате оценивается значимым коэффициентом $R=0,58$. Это позволяет утверждать, что уменьшение колебаний железа в шихте привело бы к уменьшению колебаний железа в агломерате. Использование для этих целей CaO_g и MgO_g менее эффективно из-за их меньших количеств в шихте.

Колебания основности агломерата связаны с колебаниями всех компонентов шихты, а с содержанием MgO_g в наибольшей степени.

Полученные результаты позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Содержание железа в шихте в исследованном периоде изменялось от 54,3 % до 66,1 %. Закон распределения показателя

отличался от нормального. Возможным объяснением является наличие отдельных периодов с существенными различиями в средних значениях.

2. Основность агломерата изменялась от 0,75 до 4,54 ед. Закон распределения показателя близок к нормальному. Колебания основности агломерата связаны с колебаниями всех компонентов шихты, а с содержанием MgO_g в наибольшей степени.

3. Колебания агломерата по основности и содержанию железа существенно превышают рекомендуемые.

4. Колебания агломерата по основности и содержанию железа могут быть уменьшены при уменьшении колебаний в составе шихты железа и оксида магния, что улучшит качество агломерата.

Список источников

1. Пузанов В. П., Кобелев В. А. Введение в технологию металлургического структурообразования. Екатеринбург : УрОРАН, 2005. 501 с.

2. Кармазин В. И. Обогащение руд черных металлов : учебник для вузов. М. : Недра, 1982. 216 с.
3. Шумилов К. А., Шпарбер Л. Я., Гусаров А. К. Автоматизированные системы управления подготовкой металлургического сырья и доменным переделом. М. : Металлургия, 1979. 184 с.
4. Волков Ю. П. Технолог-доменщик. М. : Металлургия, 1986. 263 с.
5. Товаровский И. Г. Доменная плавка. 2-е изд. Днепропетровск : Пороги, 2009. 768 с.

© Должиков В. В., Федотов О. В., Скубыря Н. А.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Куберским С. В.,
вед. инженером технического отдела управления ЮГМК Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 17.06.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Должиков Валерий Васильевич, канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Федотов Олег Витальевич, старший преподаватель каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: fovit2012@yandex.ru

Скубыря Никита Андреевич, магистрант каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Dolzhiikov V. V., *Fedotov O. V., Skuburya N. A. (Donbass State Technical University, Alchevsk,
Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: fovit2012@yandex.ru)

INVESTIGATING FLUCTUATIONS IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF SINTERING MIXTURE AND SINTER

Statistical analyses of studying the results of smelter's sintering plant operation have been carried out to determine the magnitude of fluctuations in the chemical composition of sintering mixture and sinter. Significant deviations from the recommended values of fluctuation intervals were found in iron content and sinter basicity. It is shown that the observed fluctuations in the sinter chemical composition can be reduced by decreasing the fluctuations of iron content in mixture.

Key words: iron ore sintering, sinter, sintering mixture, quality of sinter, fluctuations of chemical composition in the sintering mixture, fluctuations in the sinter chemical composition.

References

1. Puzanov V. P., Kobelev V. A. Introduction to metallurgical structure formation technology [Vvedenie v tekhnologiyu metallurgicheskogo strukturoobrazovaniya]. Ekaterinburg : UrDRAS, 2005. 501 p. (rus)
2. Karmazin V. I. Enrichment of ferrous metal ores: textbook [Obogashchenie rud chernykh metallov : uchebnik dlya vuzov]. M. : Nedra, 1982. 216 p. (rus)
3. Shumilov K. A., Shparber L. Ya., Gusarov A. K. Automated control systems for preparation of metallurgical raw materials and blast furnace processing [Avtomatizirovannye sistemy upravleniya podgotovkoj metallurgicheskogo syr'ya i domennym peredelom]. M. : Metalurgija, 1979. 184 p. (rus)
4. Volkov Yu. P. Technologist-blast-furnace man [Tekhnolog-domenshchik]. M. : Metalurgija, 1986. 263 p. (rus)
5. Tovarovskij I. G. Domain melting. 2nd ed. [Domennaya plavka. 2-e izdanie]. Dnepropetrovsk : Porogi, 2009. 768 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dolzhikov Valery Vasilyevich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Fedotov Oleg Vitalyevich, Senior Lecturer of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: fovit2012@yandex.ru

Skuburya Nikita Andreevich, Candidate for a Master's Degree of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING

УДК 669.18

EDN: HWCOKS

^{1,*}Еронец С. П., ²Петров П. А., ¹Мечик С. В., ²Зозуля Ф. С., ¹Прилуцкий М. И.

¹Донецкий национальный технический университет,
²Донбасский государственный технический университет

*E-mail: ersp52@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ ПРИ ИХ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПОДАЧЕ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ МНЛЗ

Обоснованы требования к системам механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок, выполнение которых обеспечивает экономию дорогостоящих сыпучих материалов, улучшает условия формирования корки отливаемого слитка и ее взаимодействия со стенками металлоприёмника, что способствует снижению колебаний нагрузки на привод его механизма качания.

Ключевые слова: кристаллизатор, заготовка, шлакообразующая смесь, механизированная подача, экономический эффект.

Подача порошкообразных или гранулированных шлакообразующих смесей (ШОС) в кристаллизаторы МНЛЗ является, как известно, обязательной технологической операцией, проводимой с целью улучшения условий формирования твердой корки отливаемой заготовки и ее силового взаимодействия с поверхностью рабочих стенок кристаллизатора [1–3]. Анализ первых практических результатов применения шлакообразующих смесей показал, что технико-экономическая эффективность их использования при разливке стали на МНЛЗ в значительной мере зависит не только от набора и свойств ингредиентов, входящих в состав смеси [4–6], но и от равномерности ее подачи и рассредоточения

по поверхности металла, контактирующей с воздушной средой. Последнее условие является определяющим при литье заготовок крупного поперечного сечения круглой и прямоугольной форм. Поэтому рабочим в процессе литья таких заготовок для поддержания толщины слоя материала на зеркале металла в кристаллизаторе, оговоренных технологической инструкцией, приходится в течение длительного времени выполнять монотонную работу, связанную с порционной подачей с помощью деревянного гребка сыпучего материала на свободную поверхность расплава (фото на рис. 1). При этом, как правило, не удается достичь стабильных показателей эффективности использования ШОС.



Рисунок 1 — Подача шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ вручную

С целью исключения действия человеческого фактора при выполнении указанной технологической операции и улучшения условий труда разливщиков стали в течение последнего десятилетия ведутся работы по созданию систем механизированной подачи ШОС. За прошедшее время в мире запатентованы десятки конструкций механических, пневматических и пневмомеханических устройств, призванных по замыслу авторов изобретений исключить ручной труд на данном производственном участке, лишь некоторые из них получили промышленное применение. В связи с этим совершенствование конструкции и обоснование рациональных рабочих параметров систем механизированной подачи ШОС являются важными научно-прикладными задачами, которые имеют особую значимость для условий отливки заготовок крупного поперечного сечения.

Целью работы является обобщение и освещение результатов накопленного авторами опыта внедрения отечественных систем механизированной подачи ШОС в составе импортных слабовых МНЛЗ в условиях кислородно-конвертерных цехов двух металлургических комбинатов (Донбасса) и их использования для выполнения принятой

в стране программы импортозамещения в области сталеплавильного производства.

В феврале 2008 года на кафедре механического оборудования заводов черной металлургии ДонНТУ, в соответствии с заключенным договором с фирмой «Солотвин», в течение 6 месяцев была разработана, спроектирована и изготовлена первая отечественная система механизированной подачи шлакообразующих смесей, предназначенная для применения на одном из ручьев слабовой МНЛЗ фирмы Siemens VAI в конвертерном цехе Алчевского металлургического комбината (фото на рис. 2). Она включает раму, смонтированную на самоходной тележке промежуточного ковша с тыльной стороны кристаллизатора. На самой раме закреплены две продольные балки, на которых установлена каретка, имеющая возможность относительного перемещения с помощью цепного привода вдоль широкой стенки кристаллизатора и несущая расходный бункер, снабженный шнековым питателем. Питатель обеспечивает подачу смеси на зеркало металла в кристаллизаторе в непрерывном режиме с заданным регулируемым расходом в соответствии со скоростью разливки.



Рисунок 2 — Промышленный образец системы подачи ШОС, разработанный на кафедре МОЗЧМ ДонНТУ

Благодаря ранее проведенным исследованиям методом натурального моделирования, с целью предварительной проверки правильности принятых технических решений еще на стадии разработки, предложенная система в ходе производственных испытаний в полной мере подтвердила свое соответствие предъявляемым требованиям относительно надежности работы, регулирования расходных характеристик и простоты эксплуатации и обслуживания. В сравнении с ручной подачей она обеспечивала требуемую степень равномерности распределения ШОС на свободной поверхности жидкой стали в кристаллизаторе (фото на рис. 3).

Авторский надзор за работой системы, проводившийся в течение 3-х лет, и результаты сопоставительного анализа показателей технико-экономической эффективности, достигнутых при ее использовании в сравнении с подачей ШОС вручную на втором ручье обслуживаемой МНЛЗ, позволили установить следующее. При механизированной подаче шлакообразующей смеси, благодаря более равномерному ее распределению на свободной поверхности жидкой стали в кристаллизаторе и образованию жидкой шлаковой прослойки по всему периметру поперечного сечения заготовки, улучшились условия взаимодействия формирующейся корочки с рабочими стенками кристаллизатора, что снизило колебания нагрузки на привод механизма его качания. Для сравнения на рисунке 4 приведены данные системы контроля параметров работы двух механизмов качания кристаллизаторов слябовой МНЛЗ, одновременно функционирующих при различных способах подачи шлакообразующей смеси [7].

При эксплуатации второй такой установки с 2011 по 2014 год в конвертерном цехе металлургического комбината «Азовсталь» на одном из ручьев слябовой МНЛЗ фирмы Danieli, как показали результаты статистической обработки данных о потреблении ШОС марки SYNThERM GS 1015/P в течение 2013 года, ее расход при переходе с ручной подачи на механизированную снизился в среднем на 8–15 % (табл. 1).



Рисунок 3 — Механизированная подача шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой МНЛЗ

Наряду с этим наличие модуля поиска и анализа данных в системе АСУ ТП этой МНЛЗ позволило выполнить сравнительную оценку изменений по ходу литья на ней заготовок таких технологических параметров функционирования кристаллизатора, как тепловой поток и его асимметрия по узким стенкам при ручной и механизированной подаче ШОС. Установлено, что в случае механизированного ввода шлакообразующей смеси колебания теплового потока в кристаллизаторе уменьшаются в 1,5 раза, а асимметрия теплового потока по противоположным (узким) стенкам кристаллизатора — в 1,6 раза.

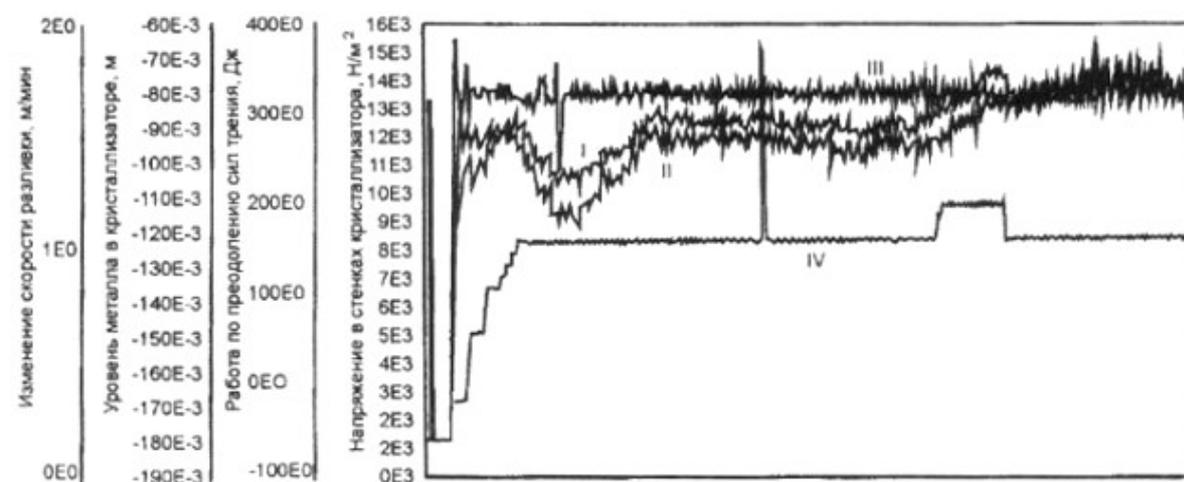
Это обусловлено стабилизацией толщины слоя ШОС в зазоре между поверхностью слитка и стенками кристаллизатора благодаря равномерному распределению смеси по всему зеркалу жидкой стали, что в итоге положительно сказалось на качестве получаемой заготовки.

Различие схем компоновки технологического оборудования в зоне размещения промежуточного ковша машин непрерывного литья слябовых заготовок, эксплуатировавшихся в конвертерном цехе ком-

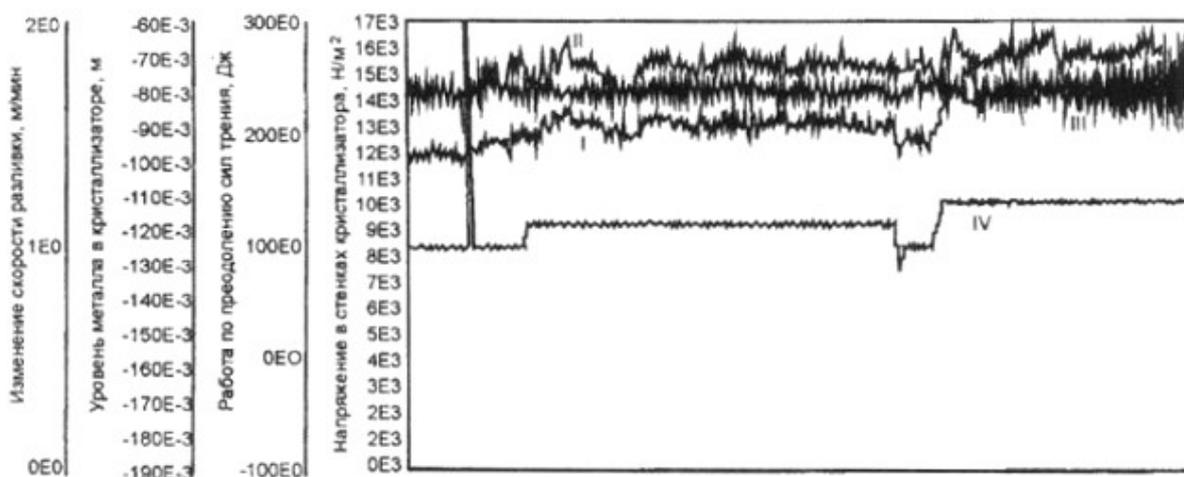
МАШИНОСТРОЕНИЕ

бината «Азовсталь», потребовало разработки другой конструктивной схемы системы механизированной подачи ШОС (фото на рис. 5), предназначенной для обслуживания МНЛЗ конструкции УЗТМ. Она содержит раму, снабженную четырьмя ходовыми колесами, попарно установленными на двух путевых балках, уложенных на рабочей площадке перпендикулярно к широкой стенке кристаллизатора. Благодаря возможности перемещения по этим балкам на расстоянии 2 м, установка может занимать две фиксированные позиции: рабочую и парковочную. При ее

нахождении в рабочей позиции подающий носок шнекового питателя располагается над передней широкой стенкой кристаллизатора, а сам питатель, установленный вместе с расходным бункером на самоходной каретке, имеет возможность перемещения по двум направляющим вдоль рамы параллельно кристаллизатору. При необходимости выполнения операций по обслуживанию разливочного узла промежуточного ковша установку откатывают в позицию парковки, обеспечивая тем самым свободный доступ к устройству быстрой смены погружного стакана.



а



б

I — работа по преодолению сил трения, Дж; II — напряжения в стенках кристаллизатора, МПа;
 III — уровень металла в кристаллизаторе, м; IV — скорость разливки, м/мин

Рисунок 4 — Зафиксированные параметры режимов работы механизмов качания кристаллизаторов при ручной (а) и механизированной (б) подачах ШОС

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 1

Показатели сокращения расхода шлакообразующей смеси при переходе с ручной подачи на механизированную

Месяц 2013 года	Ручей МНЛЗ с подачей смеси вручную			Ручей МНЛЗ с механизированной подачей смеси			Сокращение удельного расхода ШОС при механизированной подаче	
	Масса отлитых заготовок, т	Общий расход смеси, т	Удельный расход смеси, кг/т	Масса отлитых заготовок, т	Общий расход смеси, т	Удельный расход смеси, кг/т	кг/т	%
январь	82987,57	49,460	0,596	83092,93	45,540	0,548	0,048	8,1
февраль	30096,35	16,432	0,546	30860,64	15,368	0,498	0,048	8,8
март	50147,89	32,194	0,642	48369,24	28,150	0,582	0,060	9,3
апрель	41227,81	26,468	0,625	42897,80	23,722	0,553	0,072	11,5
май	35722,40	20,540	0,575	34750,88	16,854	0,485	0,090	15,6
июнь	58675,17	36,026	0,614	61416,93	33,779	0,550	0,064	10,4
июль	30794,96	18,723	0,608	29689,88	16,270	0,548	0,060	9,8
август	26081,33	14,162	0,543	27891,27	13,666	0,490	0,053	9,7
сентябрь	32387,09	19,820	0,612	33525,42	18,371	0,548	0,064	10,4
октябрь	46537,53	27,829	0,598	48550,20	25,780	0,531	0,067	11,2
ноябрь	56765,40	34,909	0,615	59220,10	30,79	0,520	0,095	15,4
декабрь	43360,56	24,88	0,574	44350,15	21,17	0,492	0,082	14,3



Рисунок 5 — Система механизированной подачи ШОС, размещаемая перед промежуточным ковшем МНЛЗ

Техническая новизна отечественных разработок, успешно прошедших промышленную проверку, защищена тремя патентами [8–10].

С учетом результатов тестовых испытаний внесли коррективы в конструктивное исполнение корпуса шнекового дозатора, который снабдили дроссельной заслонкой, позволявшей регулировать в сторону уменьшения отверстия для забора гранулированной шлакообразующей смеси, обладающей высокой текучестью. Наряду с этим также предусмотрели возможность размещения механического рыхлителя, работающего вместе с вращающимся шнеком от общего привода и устраняющего подвисание порошкообразной смеси, склонной к слеживанию и сводообразованию внутри бункера. Такие конструктивные доработки позволили в итоге обеспечить устойчивую работу шнекового дозатора вне зависимости от физических свойств мелкодисперсной смеси.

В настоящее время, в соответствии с соглашением о научно-техническом сотрудничестве между кафедрами механического оборудования заводов черной металлургии ДонНТУ и машин металлургического комплекса ДонГТУ, намечена перспектива дальнейшего развития систем механизированной подачи ШОС на основе включения в их состав блоков автоматизированного управления работой структурных механизмов с учетом меняющихся таких параметров процесса непрерывного литья заготовок, как размер поперечного сечения получаемого слитка, скорость его вытягивания из кристаллизатора, а также гранулометрический состав вводимой смеси и ее теплофизические свойства. Речь идет о необходимости разработки программных средств, позволяющих в режиме реального времени регулировать объемную подачу ШОС в кристаллизатор МНЛЗ на основании сигналов, подаваемых специальными

датчиками, о разности температур жидкой стали и на поверхности шлакового слоя, а также скорости разливки. С учетом поступившей информации по заданному алгоритму системным блоком будут формироваться управляющие команды на увеличение или уменьшение скоростей вращения шнека питателя и его перемещения вдоль широкой стенки кристаллизатора, благодаря чему должен поддерживаться оптимальный режим поступления на поверхность жидкой стали в кристаллизатор шлакообразующей смеси, обеспечивающий минимизацию ее расхода и улучшение условий формирования корки отливаемой заготовки.

Подтвержденные на практике преимущества механизированной подачи в кристаллизаторы МНЛЗ шлакообразующей смеси (снижение ее расхода и улучшение качества поверхности отливаемых заготовок) позволяют получить заметный экономический эффект, за счет которого срок окупаемости затрат на внедрение инновационной разработки не превышает 10 месяцев.

Насущная необходимость в быстром решении задач импортозамещения в области сталеплавильного производства требует ускорения работ, связанных с созданием и внедрением передовых отечественных образцов технологического оборудования, способных конкурировать с лучшими зарубежными аналогами и обеспечить повышение показателей технико-экономической эффективности производства литых заготовок крупного сечения. Перспективным направлением дальнейшего совершенствования систем механизированной подачи ШОС в кристаллизаторы машин непрерывного литья заготовок следует признать использование в их составе блоков автоматизированного управления работой структурных механизмов с учетом меняющихся параметров процесса непрерывного литья заготовок.

Список источников

1. Анализ тепловой работы кристаллизатора слябовой МНЛЗ / А. Н. Смирнов [и др.] // *Сталь*. 2011. № 5. С. 19–21.

2. Исследование гармонических режимов качания кристаллизаторов и влияние их характеристик на качество поверхности непрерывнолитых слитков / А. Ю. Цупрун [и др.] // *Металлург.* 2012. № 7. С. 40–44.

3. Цупрун А. Ю., Федосов А. В., Пащук Д. В. Разработка средств поиска и анализа технологических параметров работы кристаллизаторов МНЛЗ // *Металлургические процессы и оборудование.* 2013. № 4 (34). С. 32–38.

4. Производство теплоизолирующих и шлакообразующих смесей для современных МНЛЗ / С. В. Шлемко [и др.] // *50 лет непрерывной разливки стали в Украине : сб. науч. тр. / под ред. проф., д.т.н. Д. А. Дюдкина, проф., д.т.н. А. Н. Смирнова. Донецк : Ноулидж (донецкое отделение), 2010. С. 213–223.*

5. Комплексное использование высокоосновных теплоизолирующих, шлакообразующих рафинировочных и разливочных смесей при высокоскоростной разливке на слябовой МНЛЗ / О. Б. Исаев [и др.] // *Черная металлургия : бюл. науч.-техн. и эконом. информ.* 2007. № 7. С. 25–31.

6. Шлакообразующие смеси ТСК для кристаллизатора МНЛЗ ЗАО «АзовЭлектроСталь» / М. А. Шумаков [и др.] // *50 лет непрерывной разливки стали в Украине : сб. науч. тр. конф. Донецк, 2010. С. 507–514.*

7. Разработка устройства для непрерывной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизаторы слябовой МНЛЗ / С. П. Еронько [и др.] // *Черная металлургия : бюл. науч.-техн. и эконом. информ.* 2009. № 4. С. 36–38.

8. Устройство для непрерывной дозированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой машины непрерывного литья заготовок : пат. 96887 Украина / С. П. Еронько, М. В. Юценко ; № а201014774 ; заявл. 09.12.2009; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 23. 4 с.

9. Устройство для непрерывной дозированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой машины непрерывного литья заготовок : пат. 107731 Украина / С. П. Еронько [и др.] ; № а201305843 ; заявл. 07.05.2013 ; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 3. 6 с.

10. Устройство для подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор слябовой машины непрерывного литья заготовок : пат. 2630913 Рос. Федерация / С. П. Еронько [и др.] ; № 2015156690 ; заявл. 29.12.2015 ; опубл. 14.09.2017, Бюл. № 26. 3 с.

© Еронько С. П., Мечик С. В., Прилуцкий М. И.

© Петров П. А., Зозуля Ф. С.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. ОПМ ДонНТУ Нечепевым В. Г.

Статья поступила в редакцию 21.06.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Еронько Сергей Петрович, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. механического оборудования заводов черной металлургии им. В. Я. Седуша
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия,
e-mail: ersp52@mail.ru

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

Мечик Станислав Валерьевич, ведущий инженер каф. механического оборудования заводов черной металлургии им. В. Я. Седуша
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия

Зозуля Федор Сергеевич, аспирант каф. машин металлургического комплекса
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Прилуцкий Максим Игоревич, аспирант каф. механического оборудования заводов черной
металлургии им. В. Я. Седуша
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия

***Eron'ko S. P.** (Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia, *e-mail: ersp52@mail.ru), **Petrov P. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia), **Mechik S. V.** (Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia), **Zozulya F. S.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia), **Prilutskiy M. I.** (Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia)

INCREASING THE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF MOULD POWDERS FOR THEIR MECHANIZED FEEDING INTO CCM CRYSTALLIZERS

The requirements to the systems of mechanized feeding of mould powders into crystallizers of continuous casting machines are substantiated, the fulfillment of which provides economy of expensive bulk materials, improves conditions for the ingot crust formation and its interaction with the walls of the metal receiver, which contributes to reduction of load fluctuations on the drive of its oscillating mechanism.

Key words: crystallizer, blank, mould powder, mechanical feeding, cost impact.

References

1. Smirnov A. N. [et al.]. Analyzing the thermal operation of the slab CCM crystallizer [Analiz teplovoj raboty kristallizatora slyabovoj MNLZ]. *Steel*. 2011. No. 5. Pp. 19–21. (rus)
2. Cuprun A. Yu. [et al.]. Studying the harmonic modes of crystallizer oscillations and the influence of their characteristics on the surface quality of continuous cast ingots. [Issledovanie garmonicheskikh rezhimov kachaniya kristallizatorov i vliyanie ih harakteristik na kachestvo poverhnosti nepreryvnykh slitkov]. *Metallurgist*. 2012. No. 7. Pp. 40–44. (rus)
3. Cuprun A. Yu., Fedosov A. V., Pashchuk D. V. Developing tools for searching and analyzing technological parameters of CCM crystallizer operation [Razrabotka sredstv poiska i analiza tekhnologicheskikh parametrov raboty kristallizatorov MNLZ]. *Metallurgical processes and equipment*. 2013. No. 4 (34). Pp. 32–38. (rus)
4. Shlemko S. V. [et al.]. Production of heat-insulating and mould powder for modern CCMs [Proizvodstvo teploizoliruyushchih i shlakoobrazuyushchih smesey dlya sovremennykh MNLZ]. *50 let nepreryvnoj razlivke stali v Ukraine : sb. nauchn. tr. pod red. prof., d.t.n. D. A. Dyudkina, prof., d.t.n. A. N. Smirnova. Doneck : Noulidzh (doneckoe otdelenie)*, 2010. Pp. 213–223. (rus)
5. Isaev O. B. [et al.]. Complex use of high-base heat-insulating, slag-forming refining and casting mixtures at high-speed casting on slab CCM [Kompleksnoe ispol'zovanie vysokoosnovnykh teploizoliruyushchih, shlakoobrazuyushchih rafinirovochnykh i razlivochnykh smesey pri vysokoskorostnoj razlivke na slyabovoj MNLZ]. *Chernaya metallurgiya : byul. nauch.-tekhn. i ekonom. inform.* 2007. No. 7. Pp. 25–31. (rus)
6. Shumakov M. A. [et al.]. TSC mould powders for CCM crystallizer of ZAO "AzovElektroStal" [Shlakoobrazuyushchie smesi TSK dlya kristallizatora MNLZ ZAO "AzovElektroStal"]. *50 let nepreryvnoj razlivke stali v Ukraine : sb. nauch. tr. konf. Doneck*. 2010. Pp. 507–514. (rus)
7. Eron'ko S. P. [et al.]. Development of a device for continuous mould powder feeding into crystallizers of slab CCMs [Razrabotka ustrojstva dlya nepreryvnoj podachi shlakoobrazuyushchej smesi v kristallizatory slyabovoj MNLZ]. *Chernaya metallurgiya : byul. nauch.-tekhn. i ekonom. inform.* 2009. No. 4. Pp. 36–38. (rus)

8. Eron'ko S. P., Yushchenko M. V. Device for continuous dosed mould powder feeding into the crystallizer of a slab continuous casting machine. Patent 96887 Ukraine. No. a201014774. Submitted 09.12.2009. Published 10.11.2011. Bulletin No. 23. 4 p.

9. Eron'ko S. P. [et al.]. Device for continuous dosed mould powder feeding into the crystallizer of a slab continuous casting machine. Patent 107731 Ukraine. No. a201305843. Submitted 07.05.2013. Published 10.02.2015. Bulletin No. 3. 6 p.

10. Eron'ko S. P. [et al.]. Device for continuous mould powder feeding into the crystallizer of a slab continuous casting machine. Patent 2630913 RF. No. 2015156690. Submitted 29.12.2015 Published 14.09.2017. Bulletin No. 26. 3 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Eron'ko Sergey Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after prof. Sedush V. Ya.
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia,
e-mail: ersp52@mail.ru

Petrov Pavel Aleksandrovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Mechik Stanislav Valerievich, Leading Engineer of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after prof. Sedush V. Ya.
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia

Zozulya Fyodor Sergeievich, Postgraduate of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Prilutskiy Maxim Igorevich, Postgraduate of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after prof. Sedush V. Ya.
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia

УДК 621.658.512(035)

EDN: LFMBNL

Харламов Ю. А., Денисова Н. А., Петров П. А., Орлов А. А.Донбасский государственный технический университет***E-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТАДИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 4: СВАРИВАЕМОСТЬ МЕДНЫХ, НИКЕЛЕВЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ

Статья продолжает рассмотрение вопросов технологичности сборных конструкций, получаемых сваркой трением с перемешиванием. В предыдущих частях рассматривалась свариваемость сплавов на основе алюминия, магния и титана, а также конструкционных сталей. Данная часть статьи посвящена рассмотрению свариваемости трением с перемешиванием сплавов на основе меди, никеля и других (специальных). Кратко рассмотрены области и перспективы применения этих сплавов. Показаны преимущества технологии сварки трением с перемешиванием по сравнению с традиционными и специальными методами сварки плавлением. Систематизирована опубликованная информация о толщине свариваемых заготовок, применяемом инструменте и основных параметрах режимов технологических процессов. Из специальных рассмотрены вопросы сварки трением с перемешиванием сплавов: никеля-меди, железа-никеля, меди-серебра-циркония, никеля-титана с памятью формы, высокоэнтропийных сплавов.

Ключевые слова: *бездефектные соединения, дефекты сварки, инструмент для сварки трением с перемешиванием, подача, прочность, свариваемость сплавов, скорость вращения.*

Как уже отмечалось в предыдущих частях данной статьи, применение сварки трением с перемешиванием существенно расширяет технологические возможности получения сварных соединений с улучшенными свойствами, в том числе материалов, трудно поддающихся сварке традиционными способами. В свою очередь, это расширяет возможности создания высокотехнологичных сварных конструкций из более эффективных конструкционных материалов. В предыдущих частях статьи рассматривались вопросы свариваемости легких сплавов на основе алюминия, магния и титана, а также конструкционных сталей. Большой интерес представляют медь и ее сплавы. Технически чистая медь находит широкое применение в электротехнике, химической и других отраслях промышленности благодаря ее высоким электро- и теплопроводности, пластичности и пр. Также обширное значение и применимость имеют сплавы меди — латунь и бронза. Важнейшую роль при создании газотурбинных двигателей и других агрегатов,

работающих при высоких температурах, в атомном машиностроении и других отраслях играют сплавы на основе никеля. Наблюдается тенденция разработки, исследования и применения новых нетрадиционных металлических сплавов. Все эти сплавы уже применяются или имеют перспективы применения в сварных конструкциях, особенно с использованием технологий сварки трением с перемешиванием. Однако в настоящее время отсутствуют рекомендации по рациональному выбору основных материалов конструкций, получаемых сваркой трением с перемешиванием, в том числе таких распространенных сплавов на основе меди, никеля и других нетрадиционных сплавов.

Цель данной статьи заключается в обобщении результатов разработки и изучения технологических процессов сварки трением с перемешиванием деталей и заготовок из сплавов меди и никеля, а также специальных сплавов и подготовке рекомендаций для обеспечения технологичности проектируемых сварных конструкций.

1. Свариваемость меди и её сплавов.

Свариваемость чистой меди. Медь, благодаря высокой электро- и теплопроводности, пластичности, а также коррозионной стойкости, находит широкое применение при изготовлении токоведущих деталей, в основном электротехнических шин силового оборудования. Для меди сварка плавлением осложняется ее высокой теплопроводностью, жидкотекучестью, значительным окислением при температуре плавления и склонностью к образованию трещин. Сварка трением с перемешиванием (СТП) позволяет получать соединения меди с мелкозернистой структурой и малыми остаточными деформациями [1, 2]. Механические свойства соединений меди во многом зависят от параметров режима СТП. При СТП медных пластин толщиной 3 мм при частоте вращения инструмента 600 об/мин и увеличении скорости сварки от 25 до 200 мм/мин предел прочности на растяжение и относительное удлинение соединений сначала увеличивались, а затем уменьшались, при этом скорость сварки в диапазоне 25–150 мм/мин практически не влияла на свойства соединений [3, 4]. Разрушение соединений, полученных при указанных скоростях сварки, происходило по зонам термомеханического и термического влияния, а также по основному металлу [3, 4].

Температура в зоне сварки для формирования качественного соединения должна находиться в диапазоне 460...530 °С. При этом величина относительного удлинения может превышать аналогичный параметр основного металла в 3 раза [5]. Прочность на растяжение и твердость сварного соединения составили около 60 % от основного металла.

На механические свойства соединений оказывают влияние условия теплоотвода от свариваемых заготовок. При СТП медных пластин толщиной 2 мм с частотой вращения инструмента 1600 об/мин и со скоростями перемещения 50 и 100 мм/мин при более низких частотах вращения и более высоких скоростях перемещения наблюдались туннельные дефекты и пустоты из-за

недостаточных тепловыделений и скорости течения пластифицированного материала. СТП с водяным охлаждением позволила получить более мелкую микроструктуру с увеличением показателей прочности и относительного удлинения. Механические свойства сварных соединений оказались выше, чем у основного металла, в отличие от соединений, полученных на воздухе при тех же параметрах режима [6].

Надежные бездефектные соединения могут быть получены с использованием различных форм пина: конического, цилиндрического, конического с резьбой, цилиндрического с резьбой, треугольного, квадратного, пятиугольного и шестиугольного. В зависимости от применяемой формы пина инструмента показатели механических свойств сварных соединений колебались на уровне 65–85 % от показателей основного металла. Соединения, выполненные с использованием квадратного профиля пина инструмента, имели лучшие механические свойства по сравнению с другими формами инструмента [7, 8].

Для СТП меди и её сплавов рекомендуется применять инструменты из стали Н13, жаропрочных никелевых сплавов, вольфрама и поликристаллического нитрида бора [9–11], а также комбинированные инструменты с пином из вольфрама и заплечиком из быстрорежущей стали [12].

При СТП технической чистой меди толщиной 4 мм при частоте вращения инструмента 1250 об/мин, скорости сварки 61 мм/мин, угле наклона инструмента 3° прочность соединений достигала ~87 % от прочности основного металла [13]. В центральной области шва наблюдалась мелкая и равномерная структура, размер зерен зоны перемешивания был ~100 мкм, в зоне термического влияния — 230 мкм при размере зерен основного металла 210 мкм. При твердости основного металла 105–110 HV сварной шов имел значение от 60 до 90 HV [13].

Отсутствие дефектов и мелкозернистая структура сварного соединения обеспечивают высокие значения электропроводности [13].

Получению соединения без наружных и внутренних дефектов способствует применение инструмента с конической формой заплечика с вогнутой поверхностью. В соединениях с туннельным дефектом показатель временного сопротивления при растяжении ниже на 33 %, а относительного удлинения — на 8 %, чем у шва без дефектов. Увеличение электрического сопротивления не превышает 0,3 % относительно основного металла (ОМ).

При СТП медных пластин толщиной 4 мм с помощью стального инструмента размер зерна в зоне перемешивания (ЗП) очень мелкий и равноосный по сравнению с основным металлом. Прочность соединений, полученных СТП, выше, чем при электроннолучевой и аргонодуговой сварке. Размер зерна в соединениях уменьшается с увеличением скорости вращения инструмента или с уменьшением скорости сварки [14].

Свариваемость латуней. Латунь (сплав Cu–Zn) обладает более высокими пластичностью, прочностью, твердостью и коррозионной стойкостью, чем чистая медь, поэтому широко применяется в качестве конструкционных материалов в промышленности. Традиционная сварка латуни плавлением имеет очевидные ограничения. Во время сварки плавлением испарение и плавление большого количества элемента Zn приводят к разрушению сварного соединения из-за более низкой температуры пара Zn (907 °С). В [15] успешно применяли СТП для сварки пластин латуни (Cu; 38 % Zn; 0,15 % Fe; 0,08 % Pb; 0,5 % Ni) при постоянной скорости перемещения 100 мм/мин и при скоростях вращения инструмента 400, 600, 800 и 1000 об/мин соответственно. Использовался инструмент с заплечиком диаметром 18 мм и цилиндрическим резьбовым пином диаметром 6 мм и длиной 4,7 мм. Угол наклона для всех сварных швов поддерживался на уровне 2,5°, а глубину погружения контролировали на уровне ~0,2 мм. ЗП состояла из частично и полностью перекристаллизованных областей. С увеличением скорости вращения доля нерекристал-

лизованных зерен уменьшалась, а размер рекристаллизованных зерен увеличивался. Значения твердости в ЗП были выше, чем в исходном материале. Увеличение скорости вращения не оказало заметного влияния на предел прочности и текучести сварных швов, но увеличило удлинение. Предел прочности и текучести сварных швов достигал 99 и 80 % от ОМ соответственно. Разрушение произошло в зоне термического влияния, имеющей наименьшую твердость. В [14] при СТП латуни испарения цинка и меди не обнаружено. Механические свойства соединения достигались аналогичные основному металлу. В микроструктуре в ЗП наблюдается меньшее количество пор по сравнению со сваркой плавлением [16–19].

В [20] СТП использовали для соединения пластин латуни (37 мас. % Zn и 63 мас. % Cu). Перед сваркой пластины были отожжены при температуре 50 °С в течение 1 часа. Для получения двухфазного сплава пластину нагревали при 810 °С в течение 70 минут, а затем закаливали в воде при комнатной температуре. Использовался инструмент с цилиндрическим заплечиком (диаметром 12 мм) и цилиндрическим пином (диаметром 3 мм и длиной 1,7 мм), изготовленным из инструментальной стали Н13. СТП проводили при скорости вращения инструмента 450 об/мин и скорости перемещения 100 мм/мин параллельно начальному направлению прокатки листов при комнатной температуре. Угол наклона инструмента относительно нормального направления поверхностей пластин сохранялся постоянным и составлял 2,5°. Предел прочности на растяжение получаемых соединений был выше по сравнению с основным металлом: для однофазных сплавов 335 МПа и 248 МПа соответственно; для двухфазных сплавов 394 МПа и 285 МПа соответственно. Относительное удлинение соединений было ниже, чем у основного металла: для однофазных сплавов 47 % и 68 % соответственно; для двухфазных сплавов 38 % и 52 % соответственно.

Свариваемость бронзы. В [21] при СТП литой никель-алюминиевой бронзы микротвердость зоны перемешивания и зоны термомеханического воздействия была выше, чем у основного металла. Поперечная прочность сварного соединения выше, чем у основного металла. Основным вклад в повышение механических свойств сплава вносят измельченные зерна в зоне сварочного ядра. Сварной шов без дефектов получали при использовании осевой нагрузки 16 кН, скорости сварки 60...80 мм/мин и скорости вращения 1400...1600 об/мин. Разрушение соединений с дефектами и без дефектов происходило в ЗТВ.

Сварка плавлением бериллиевой бронзы (сплавов бериллия и меди) затруднена из-за образования включений, дыр, пористости и растрескивания при затвердевании в ЗТВ. При лазерной сварке необходимо решение проблемы разбрызгивания и высокой пористости соединений. В [22] проводили СТП пластин бериллий-медного сплава «С17200» (1,9 % Be; 0,2 % Si; 0,2 % Al) толщиной 3 мм. Использовали инструмент из карбида вольфрама (WC) длиной 2,7 мм с полусферическим зондом (диаметр 6 мм) и вогнутым заплечиком (диаметр 15 мм). Сварку трением с перемешиванием проводили при скорости вращения инструмента 700 об/мин и скорости перемещения инструмента 60 мм/мин с угловым смещением 2 градуса в качестве стандартных условий. Бездефектные соединения получали при скорости вращения инструмента и скорости перемещения 700 об/мин и 60 мм/мин соответственно. Для получения прочных соединений с приемлемыми механическими свойствами необходима термообработка в течение 3–4 часов при температуре 315 °С.

Свариваемость разнородных медных сплавов. Разнородные медные соединения без дефектов могут быть легко получены СТП. Медь успешно соединяется с латуной и бронзами [23]. При СТП медных и латун-

ных сплавов смещение инструмента в сторону меди образует луковичную кольцеобразную зону, а при смещении инструмента в сторону латунного сплава эта зона не наблюдалась [24]. По сравнению с инструментом без смещения прочность на разрыв при смещении инструмента в сторону меди на 1 мм увеличилась на 33,33 %. При смещении инструмента на 1 мм в сторону латунного сплава прочность на разрыв увеличилась на 57,47 %, а прочность на изгиб увеличилась примерно на 5 % по сравнению с образцом без смещения. Наилучшие механические и микроструктурные свойства достигаются при смещении инструмента на 1 мм в сторону латунного сплава.

При СТП меди и латуни внахлест медь была выбрана в качестве выступающей стороны, а латунь — в качестве отступающей стороны [25]. В ЗП формировались слоистые луковичные кольца, постепенно исчезающие при увеличении сварочного теплового вложения. Механические свойства, в том числе прочность на растяжение-сдвиг и микротвердость, повышались при снижении погонной энергии при сварке. Максимальные предел прочности и микротвердость наблюдались при частоте вращения инструмента 450 об/мин и скорости 16 мм/мин⁻¹. Имела место тенденция к хрупкому разрушению при больших сварочных тепловложениях.

2. Свариваемость никелевых сплавов. Суперсплавы на основе никеля отличаются высокой стойкостью к окислению и коррозии и применяются в экстремальных условиях высокого давления и температуры. Применение процессов сварки плавлением для этих сплавов затруднено большой зоной термического влияния (ЗТВ), снижением коррозионной стойкости соединений и ухудшением химических и механических свойств и пр. Это обусловило широкое развитие работ по сварке никелевых сплавов в твердой фазе. Состав основных видов никелевых сплавов приведен в таблице 1.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 1

Никелевые сплавы

Марка сплава	Состав	Аналоги
201	Технически чистый никель (99,6 % Ni)	
600	>72,0 % Ni; 14–17 % Cr; 6–10 % Fe; Cu; Mn; ...	ХН60ВТ; ХН78Т
625	>58 % Ni; 20–30 % Cr; 8–10 % Mo; 3,15–4,15 % Nb; ...	ХН75МБТЮ
718	50–55 % Ni; 17–21 % Cr; 4,75–5,5 % Nb; 2,8–3,0 % Mo; Al; Cu; Ti; Co; Mn; Fe; ...	ХН45МВТЮБР
825	38–46 % Ni; 19,5–23,5 % Cr; 2,5–3,5 % Mo; 1,5–3,0 % Cu; 0,6–1,2 % Ti; >22 % Fe; ...	

Пластины сплава 201 (технически чистый никель) толщиной 3,2 мм были соединены встык с использованием инструмента заплечиком диаметром 16 мм [26]. Соединение представляло собой сварной шов с частичным проплавлением, чтобы избежать осложнений, связанных с приближением пина к опорной пластине. Предел текучести и предел прочности металла сварного шва составили 193 и 448 МПа соответственно по сравнению с 103 и 406 МПа для основного материала. Удлинение поперечного образца составило 34 % по сравнению с 50 % для основного материала.

Пластины из сплава 600 толщиной 6 мм сваривались встык с использованием инструмента из ПКНБ [26]. Скорость шпинделя составляла 450 об/мин, а скорость перемещения — 56 мм/мин. В зоне перемешивания наблюдалось существенное измельчение зерна. Механические свойства были превосходными. Предел текучести и предел прочности составили 370 и 720 МПа соответственно по сравнению с 265 и 630 МПа для основного металла. Удлинение сократилось с 50 % в основном металле до 27 % в поперечном сварном шве.

Пластины из сплава 718 толщиной 3,2 мм сваривались встык инструментом с диаметром заплечика 16 мм [26]. Скорость шпинделя составляла 500 об/мин, а скорость перемещения — 50 мм/мин. Получали прочные сварные швы при существенном измельчении зерна по сравнению с основным материалом. Предел текучести и предел прочности образцов поперечного сварного шва составили 670 и 985 МПа со-

ответственно. Значения текучести и прочности на разрыв составляют 460 и 895 МПа для сплава 718 в отожженном состоянии.

Соединения сплавов никеля, полученные СТП, не имеют дефектов по сравнению с соединениями, получаемыми при сварке плавлением [14]. Размеры зерен сварных швов при СТП уменьшаются до 85 % значений размеров зерен при сварке плавлением. Однако прочность на разрыв несколько ниже, чем у основного металла. Для СТП сплавов на основе никеля применяют инструменты, оснащенные ПКНБ, твердыми сплавами системы «карбид вольфрама — кобальт и Si₃N₄» [27]. Результаты исследования СТП сплавов Инконель 600, 625 и 718 представлены в таблице 2. В большинстве получаемых СТП соединений достигнуто измельчение зерен, что обусловило улучшение их механических свойств [28–37]. По сравнению с СТП алюминиевых сплавов осевое усилие и скорость сварки сплавов на основе никеля были очень высокими, но скорость вращения была меньше. В большинстве исследований в качестве инструментального материала использовались WC-Co или ПКНБ.

Термическая обработка значительно повышает механические свойства никелевых сплавов, сваренных трением с перемешиванием. В таблице 3 представлены некоторые механические свойства соединений различных сплавов на основе никеля при сварке трением с перемешиванием.

Микротвердость в зоне перемешивания значительно выше по сравнению с микротвердостью основного металла.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 2

Параметры, используемые при СТП сплавов на основе никеля

Сплав	Материал инструмента	Длина пина, мм	Диаметр заплечика, мм	Толщина пластины, мм	Осевая сила, кН	Скорость сварки, мм/мин	Скорость вращения, об/мин	Источник
600	pcBN	3	25	4,8	-	60	600	[28]
600	WC-Co	1,8	-	2	-	100	400	[29]
600	WC-Co	1,8	15	2	22,5	150-250	400	[30]
600	WC-Co	1	15	1	22,5	100	200	[31]
625	WC-Co	1,8	15	2	42,1	100	200	[32]
625	WC-Co	1,8	15	2	-	100	200	[33]
625	pcBN	3	25	3,2	50	100	200	[34]
625	pcBN	3	25	3,2	50	100	200	[35]
718	Si3N4	3,6	20	4	-	30-80	400	[36]
825	pcBN	2	14,3	2	-	75	2000	[37]

Таблица 3

Механические свойства никелевых сплавов при СТП

Марка сплава	Материал инструмента	Микротвердость		Предел прочности на растяжение		Источник
		Сварное соединение, (HV)	OM (HV)	Зона перемешивания (МПа)	OM (МПа)	
600	pcBN	-	-	620	600	[28]
600	WC-Co	180	170	740	690	[29]
600	WC-Co	185	165	680	640	[30]
600	WC-Co	235	190	-	-	[31]
600	WC-Co	200	185	718	698	[38]
625	WC-Co	360	245	1152	943	[33]
625	pcBN	302	270	-	-	[34]
625	pcBN	305	243	-	-	[35]
718	Si3N4	260	230	823	-	[36]
825	pcBN	320	165	-	708	[37]

Это происходит главным образом за счет измельчения зерен в зоне сварки трением с перемешиванием. Выделение наноразмерных частиц в зоне сварки также приводит к значительному улучшению механических свойств [37]. Большая часть изменений микроструктуры происходит в основном за счет рекристаллизации, образовавшейся в результате деформации. При испытаниях на растяжение соединений предварительно пластически деформированных сплавов разрушение происходит в основном металле, поскольку сварные швы, полученные СТП, имеют более высокие значения предела прочности.

В работе [39] показано, что СТП уменьшила склонность к межкристаллитной коррозии сплава 625 марки I, подвергнутого мягкому отжигу.

3. Свариваемость специальных сплавов. Монель — конструкционный сплав, основными составляющими которого являются никель (не менее 63 %) и медь (28...34 %). Обладает особыми характеристиками, такими как высокая прочность и хорошая ударная вязкость в широком диапазоне температур, высокая коррозионная стойкость в различных кислых и щелочных

средах. Монель привлекает большое внимание в морской и нефтехимической промышленности, поэтому спрос на сварку деталей из монеля растет. Сварка плавлением приводит к появлению таких дефектов соединений, как сегрегация, газовая и усадочная пористость, остаточные напряжения и т. д., что снижает конечные механические свойства.

В работе [40] методом СТП получены качественные соединения пластин сплава Монель 400 (около 67 % Ni–23 % Cu) толщиной 2 мм. Инструмент FSW был изготовлен из твердого сплава WC-Co и имел пин диаметром ~1,75 мм и заплечик диаметром 12 мм. Значения скорости вращения инструмента и скорости сварки составляли 900 об/мин и 25 мм/мин соответственно. Механические свойства в различных зонах сварных соединений представлены в таблице 4. Более высокими механическими свойствами соединений обладают сплавы в состоянии после прокатки.

Для соединения сплава Invar 36 разработан новый подход, названный сваркой трением с перемешиванием при большой нагрузке и низкой скорости [42]. Зона перемешивания характеризовалась средним размером зерен 0,7 мкм и большеугловыми

границами. В зернах также образовалось большое количество двойниковых границ. Механизм измельчения зерна объясняется сочетанием прерывистой динамической рекристаллизации и динамической рекристаллизации с помощью полос микросдвига. Было достигнуто хорошее сочетание прочности и пластичности Invar 36.

Два высокотемпературных штифтовых инструмента — один из ПКНБ, а другой из W–25 % Re — использовались для сварки трением с перемешиванием пластины из инвара (Fe–36 % Ni) толщиной 12,7 мм [43]. Качественные сварные швы были получены при скорости вращения 600 об/мин и скоростях перемещения 76, 102 и 127 мм/мин. Коэффициент теплового расширения, предел прочности и микротвердость сварных швов оказались практически неизменными по сравнению с основным материалом. Остаточное удлинение составило 52 % для основного материала и 30 и 37 % для сварных швов, выполненных с помощью обоих инструментов. Оба штифтовых инструмента давали сопоставимые сварные швы, но инструмент W-Re демонстрировал больший износ и оставлял небольшие остатки износа в сварном шве, особенно в месте погружения.

Таблица 4

Механические свойства сплава Монель 400 и его соединений при СТП

Состояние исходного материала	Механические свойства				
	Показатели	ОМ	ЗТВ	ЗТМВ	ЗП
После отжига	HV	172±5	162±4	194±4	177±5
	σ, МПа	194±7,5	171,5±8,1	253,4±6,3	215,9±4,2
После прокатки	HV	216±5	204±3	198±4	192±4
	σ, МПа	308,4±11,2	279,2±10,1	261,3±7,8	238,8±7,5

Примечание. Сплав Invar 36. Сплав Fe–36 % Ni (Invar 36) имеет аустенитную однофазную структуру и отличается уникальным низким значением коэффициента теплового расширения (КТР) при температуре Кюри. Применение способов сварки плавлением приводит к растрескиванию соединений, а при легировании присадочных материалов Ti, Mn и Mo увеличивает КТР сварных швов. При СТП пластин толщиной 3 мм получены бездефектные сварные швы [41]. Применяли опорные пластины из нержавеющей стали и инструмент из ПКНБ с выпуклым заплечиком с диаметром 15,3 мм и коническим пином; скорость сварки 2 мм/с, скорость вращения инструмента 600, 800 и 1000 об/мин. Сварные швы имели структуру однородного крупного аустенита. Сохранялось значение КТР, а механические свойства были немного ниже по сравнению с основным материалом.

Сплав NARloy-Z (Cu–3 wt. % Ag–0.5 wt. % Zr) обладает очень высокой теплопроводностью, но недостаточно высокими механическими свойствами при повышенных температурах. Пластины Narloy-Z (толщиной ~6 мм) были сварены с использованием установки ESAB SuperStir. Сварной шов выполнялся при 450 об/мин и скорости 100 мм/мин (4,0 дюйма/мин). Чистота поверхности полученного сварного шва оказалась превосходной. Видимого износа инструмента не было.

Сплавы с памятью формы. СТП может быть успешно использована для соединения эквивалентных никель-титановых (NiTi) сплавов с памятью формы толщиной 2 мм [44]. Сочетание вращения инструмента со скоростью 400 об/мин и скоростью перемещения 75 мм/мин позволило получить бездефектный сварной шов с максимальной эффективностью соединения 93 % при температуре окружающей среды и 84 % при повышенной температуре (125 °C). Микроструктура сварного шва представляла собой типичную зону перемешивания с мелкими зернами, сравнительно небольшую зону термомеханического воздействия и зону термического влияния. Однородная твердость по всей зоне сварного шва указывает на отсутствие в шве вредных выделений. Зона сварного шва показала сравнительно меньшую коррозионную стойкость, чем основной материал, из-за формирования менее плотного пассивного слоя TiO₂.

ЗП имела значительную степень измельчения зерна со средним размером зерен 20,4±1,8 мкм, что намного меньше, чем зерна длиной 1 мм в основном металле. ЗТМВ в основном состояла из деформированных зерен, близких по размеру и напоминающих основной металл.

Разрушение произошло в ЗП как при температуре окружающей среды, так и при повышенной температуре. При температуре окружающей среды наблюдались микротрещины, перпендикулярные направлению растягивающей нагрузки, а при повы-

шенной температуре, при ступенчатом растягивающем нагружении, наблюдались микротрещины, перпендикулярные направлению нагрузки, и слияние трещин. Пластичность и эффективность соединения сопоставимы с наиболее широко используемым методом лазерной сварки.

При дополнительном воздействии лазером мощностью 50 Вт достигнута максимальная скорость СТП NiTi-сплавов 342 мм/мин [45].

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭА) представляют собой новый класс конструкционных материалов [23, 46]. Они содержат минимум пять основных легирующих элементов. Элементы почти эквимольного состава, но кристаллизуются в виде одной фазы. Микроструктурная эволюция в результате СТП изучалась в сплавах CoFeNiCrMn, CoFeNiCrMo, AlCoCrFeNi, а также в сплавах FeMnCoCrSi на основе железа. В большинстве случаев в окончательной микроструктуре ЗП доминирует фаза ГЦК. Однако в сплавах на основе железа конечная микроструктура дополнительно включала незначительную часть фазы ГПУ. Обычно СТП приводит к резкому измельчению зерна, и это часто объясняется с точки зрения динамической рекристаллизации. Существует конкуренция между непрерывной и дискретной динамической рекристаллизацией. На эти процессы также может влиять износ инструмента для СТП. В сплавах FeMnCoCrSi на основе железа эволюция микроструктуры дополнительно осложняется обширными фазовыми превращениями.

Высокоэнтропийные сплавы открывают огромный потенциал для замены традиционных сплавов благодаря превосходному сочетанию свойств, например, для преодоления традиционного компромисса между прочностью и пластичностью или для достижения высокой прочности в сочетании с превосходной коррозионной стойкостью, даже превосходя Ni-сплавы в высокотемпературном применении [47]. Для обеспече-

ния возможности использования ВЭА в качестве функциональных или конструктивных материалов в реальных компонентах очень важно развивать работы по более детальным исследованиям их свариваемости.

Выводы:

1. Применение сварки трением с перемешиванием существенно расширяет возможности создания сварных конструкций из сплавов на основе меди и никеля, а также специальных сплавов, трудно свариваемых методами сварки плавлением. Более высокие механические свойства получаемых соединений позволяют снизить материалоемкость выпускаемых изделий из этих сплавов за счет уменьшения массы расчетных сечений.

2. Сварка сплавов на основе меди, никеля и специальных сплавов между собой в значительной мере может облегчить решение конструкторских задач при создании сложных изделий различного назначения.

3. Использование сварки трением с перемешиванием позволяет упростить конструкции изделий и узлов из сплавов меди и никеля, а также из специальных сплавов путем замены механических неразъемных соединений на сварные.

4. Разработка и освоение технологий сварки трением с перемешиванием деталей из сплавов меди и никеля и других металлов требует создания инструментов из материалов с более высокой теплостойкостью, прочностью и износостойкостью, обладающих достаточной стойкостью при сварке протяженных швов.

5. Из-за отсутствия доступной информации в литературе требуется дальнейшая работа по обобщению разработок и исследований сварки трением с перемешиванием сплавов меди и никеля и других специальных сплавов для создания общетехнических рекомендаций по выбору этих сплавов с учетом их свариваемости.

Список источников

1. Исследование влияния параметров режима сварки трением с перемешиванием меди на механические свойства и электропроводность сварных соединений / В. В. Апрощенко [и др.] // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. № 3. С. 50–60. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-50-60
2. Friction stir welding of copper: numerical modeling and validation / P. Sahlot, A. K. Singh, V. Badheka, A. Arora // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72. № 5. P. 1339–1347. DOI: 10.1007/s12666-019-01629-9
3. Friction stir welding of copper: Processing and multi-objective optimization / G. Singh, A. Thakur, S. Singh, N. Sharma // *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2020. Vol. 27. № 3. P. 709–716.
4. Shen J. J., Liu H. J., Cui F. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper // *Materials and Design*. 2010. Vol. 31. № 8. P. 3937–3942. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.03.027
5. Hwang Y. M., Fan P. L., Lin C. H. Experimental study on Friction Stir Welding of copper metals // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. № 12. P. 1667–1672. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019
6. Farrokhi H., Heidarzadeh A., Saeid T. Frictions stir welding of copper under different welding parameters and media // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013. Vol. 18. № 8. P. 697–702. DOI: 10.1179/1362171813Y.0000000148
7. Современное состояние и перспективы развития сварки изделий из меди трением с перемешиванием / В. В. Апрощенко [и др.] // *Сварка и диагностика*. 2021. № 2. С. 39–42. DOI: 10.52177/2071-5234_2021_02_39
8. Kumar A., Raju L.S. Influence of tool pin profiles on friction stir welding of copper // *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. Vol. 27. № 12. P. 1414–1418. DOI: 10.1080/10426914.2012.689455
9. Особенности формирования соединений при сварке трением с перемешиванием меди / А. С. Селиванов [и др.] // *Инновационное и цифровое машиностроение : материалы Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение», Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства*

России» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа : УГАТУ, 2021. URL: https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf.

10. Nakata K. Friction stir welding of copper and copper alloys // *Welding International*. 2005. № 19 (12). P. 929–933.

11. Разработка сварочного инструмента и режимов сварки электротехнических шин из меди М1 способом сварки трением с перемешиванием / А. Л. Сотников [и др.] // *Сварочное производство*. 2023. № 6. С. 40–45. DOI: 10.34641/SP.2023.1063.6.051

12. Pashazadeh H., Teimournezhad J., Masoumi A. Numerical investigation on the mechanical, thermal, metallurgical and material flow characteristics in friction stir welding of copper sheets with experimental verification // *Materials and Design*. 2014. № 55. P. 619–632.

13. Lee W.-B., Jung S.-B. The joint properties of copper by friction stir welding // *Materials Letters*. 2004. Vol. 58. № 6. P. 1041–1046. DOI: 10.1016/j.matlet.2003.08.014

14. Verma S. M., Misra J. P. A Critical Review of Friction Stir Welding Process // *DAAAM International Scientific Book*. Vienna, Austria : DAAAM International, 2015. Chapter 22. P. 249–266. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2015.22

15. Xie G. M., Ma Z. Y., Geng L. Effects of Friction Stir Welding Parameters on Microstructures and Mechanical Properties of Brass Joints // *The Japan Institute of Metals : Materials Transaction*. 2008. Vol. 49. № 7. P. 1698–1701.

16. Lee W., Jung, S. B. The joint properties of copper by friction stir welding // *Materials Letters*. 2004. № 58. P. 1041–1046.

17. Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behaviour of pure copper joints / H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, A. Heidarzadeh, E. Nazari // *Materials and Design*. 2012. № 35. P. 330–334.

18. Lin W. J., Chang H. C., Wu M. H. Comparison of mechanical properties of pure copper welded using friction stir welding and tungsten inert gas welding // *J. of Manufacturing Processes*. 2014. № 16. P. 296–304.

19. Meran C. The Joint Properties of Brass Plates by Friction Stir Welding // *Materials & Design*. 2006. № 27. P. 719–726.

20. Akbar Heidarzadeh, Tohid Saeid. On the effect of β phase on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded commercial brass alloys // *Data in Brief*. 2015. P. 1022–1025.

21. Effect of Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Cast Nickel Aluminum Bronze Alloy (C95800) / S. Siva, S. Sampathkumar, J. Sudha, R. M. Anirudh // *Materials Research*. 2018. № 21 (3) : e20170603. 13 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0603>

22. Lim Y., Lee K., Moon S. Effects of a Post-Weld Heat Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of a Friction-Stir-Welded Beryllium-Copper Alloy // *Metals*. 2019. № 9 (461). 14 p. DOI: 10.3390/met9040461

23. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution / A. Heidarzadeh [et al.] // *Progress in Materials Science*. 2021. № 117. 100752. 68 p.

24. Hamid Reza Sadeghi, Kamran Amini, Farhad Gharavi. Effect of tool offset on microstructure and mechanical properties of dissimilar copper-brass friction stir welding // *Metall. Res. Technol*. 2021. № 118. 307. 9 p.

25. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of friction stir-welded copper/brass dissimilar joints / Farhad Gharavi, Iman Ebrahimzadeh, Kamran Amini, Pourya Darya // *Materials Research Express*. 2018. № 5 (7). 076517. 19 p. DOI: 10.1088/2053-1591/aacf20

26. Sorensen C. D., Nelson T. W. Friction Stir Welding of Ferrous and Nickel Alloys // *Friction Stir Welding and Processing*. 2007. 05112G. P.111–121.

27. Hari Venkit, Senthil Kumaran S. A review on friction stir welding of inconel alloys // *Journal of Critical Reviews*. 2020. Vol. 7. Iss. 19. P. 4361–4371.

28. Optimizational study of friction welding of steel tube to aluminum tube plate using an external tool process / C. V. Kumar, S. Muthukumaran, A. Pradeep, K. S.Senthil // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2011. Vol. 6–2. P. 300–306.

29. Ye F., Fujii H., Tsumura T. Friction stir welding of Inconel alloy 600 // *J. Mater. Sci.* 2006. Vol. 41 (16). P. 5376–5379.
30. Song K. H., Nakata K. Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of friction stir welded Inconel 600 // *Mater. Design.* 2009. Vol. 30 (10). P. 3972–3978.
31. Song K., Chung Y., Nakata K. Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Jointed Inconel 600/SS 400 // *Metals and Materials International.* 2012. Vol. 35. P. 126–132.
32. Song K. H., Nakata K. Effect of precipitation on post heat-treated Inconel 625 alloy after friction stir welding // *Mater. Design.* 2010. Vol. 31 (6). P. 2942–2947.
33. Song K. H., Nakata K. Mechanical properties of friction stir welded Inconel 625 alloy // *Mater. Trans.* 2009. Vol. 50 (10). P. 2498–2501.
34. Senthil Kumaran S., Muthukumaran S., Chandrasekhar R. C. Suitability of friction welding of tube to tube plate using an external tool process for different tube diameters // *A study. Experimental Techniques.* 2013. Vol. 37 (6). P. 8–14.
35. Lemos G. V. B., Farina A. B., Martinazzi D. O efeito da velocidade de rotação da ferramenta na soldagem por fricção e mistura mecânica da liga inconel 625 // *ABM Week : 71º Congresso Anual ABM, Rio de Janeiro.* 2016. DOI: 10.5151/1516-392X-28078
36. Ahmed M. M. Z., Wynne B. P., Martin J. P. Effect of friction stir welding speed on mechanical properties and microstructure of nickel based super alloy Inconel 718 // *Sci. Technol. Weld. Join.* 2013. Vol. 18 (8). P. 680–687.
37. Das H., Mondal M., Hong S. T., Lee J. W., Cho H. H. Texture and precipitation behavior of friction stir welded Inconel 825 alloy // *Materials Today Communications.* 2020. № 25 (5) :101295.
38. Song K. H., Tsumura T., Nakata K. Development of microstructure and mechanical properties in laser-FSW hybrid welded Inconel 600 // *Mater. Trans.* 2009. Vol. 50 (7). P. 1832–1837.
39. Mitigating the susceptibility to intergranular corrosion of alloy 625 by friction-stir welding / Guilherme Vieira Braga Lemos [et al.] // *Scientific Reports.* 2022. № 12 : 3482. 10 p.
40. High-resolution EBSD characterisation of friction stir welded nickel-copper alloy: effect of the initial microstructure on microstructural evolution and mechanical properties / Heidarzadeh A., Ali Chabok, Reza Taherzadeh Mousavian, Yutao Pei // *Philosophical Magazine.* 2020. № 100 : 3. P. 337–352. DOI: 10.1080/14786435.2019.1680889
41. Microstructure and properties of friction stir welded high strength Fe–36 wt%Ni Alloy / Yue Zh., Yutaka S. S., Kokawa H., Wu A. // *Materials Science and Engineering A.* 2011. № 528. P. 7768–7773.
42. Nan Xu, Qining Song, Ye-feng Bao. Microstructure and mechanical properties' modification of friction stir welded Invar 36 alloy joint // *Science and Technology of Welding and Joining.* 2019. № 24 : 1. P. 79–82. DOI: 10.1080/13621718.2018.1490104
43. Jasthi B. K., Arbegast W. J., Howard S. M. Thermal Expansion Coefficient and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Invar (Fe-36%Ni) // *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2009. № 18. P. 925–934. DOI: 10.1007/s11665-008-9320-7
44. Part I: Friction stir welding of equiatomic nickel titanium shape memory alloy — microstructure, mechanical and corrosion behavior / Parker W. [et al.] // *Journal of Advanced Joining Processes.* 2021. № 4. 100071. 18 p. DOI: 10.1016/j.jajp.2021.100071
45. Mani Prabu S. S., Palani I. A. Investigations on the actuation behaviour of friction stir-welded nickel titanium shape memory alloy using continuous fibre laser // *Journal of Micromanufacturing.* 2022. № 5 (2). P. 137–143. DOI: 10.1177/25165984211015409
46. Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / З. Б. Батаева [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* 2021. Т. 23. № 2. С. 116–146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146
47. Richter T., Schroepfer D., Rhode M. Residual Stresses in a High- and a Medium-Entropy Alloy due to TIG and Friction Stir Welding // *J. Manuf. Mater. Process.* 2022. № 6. 147. 11 p. DOI: 10.3390/jmmp6060147

Рекомендована к печати к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М., д.т.н., проф., каф. МОЗЧМ им. профессора В. Я. Седуша ДонНТУ Сотниковым А. Л.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

Денисова Наталья Анатольевна, канд. техн. наук, заведующий каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: Natdeny@yandex.ru

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: pavelpetrov@list.ru

Орлов Андрей Андреевич, ассистент каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru

***Kharlamov Yu. A., Denisova N. A., Petrov P. A., Orlov A. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com)

ENSURING MANUFACTURABILITY OF STRUCTURES DURING FRICTION STIR WELDING AT THE MATERIALS SELECTION STAGE. PART 4: WELDABILITY OF COPPER, NICKEL AND SUPERALLOYS

This article continuously discussing the manufacturability of composite structures produced by friction stir welding. Previous parts covered the weldability of aluminium, magnesium, titanium-based alloys, and structural steels. This part of the article focuses on the friction stir weldability of copper, nickel, and other (special) alloys. There have been briefly reviewed the areas and potential applications of this alloys. The advantages of friction stir welding technology are compared to traditional and special fusion welding methods. The published information on the thickness of welded workpieces, applied tools, and basic parameters of technological process regimes is systematized. The issues of friction stir welding with alloys: nickel-copper, iron-nickel, copper-silver-zirconium, nickel-titanium with shape memory, high-entropy alloys are considered among the special ones.

Key words: proper joints, welding defects, tool for friction stir welding, feeding, durability, weldability of alloys, rate of rotation.

References

1. Antroshchenko V. V. [et al.]. Investigation of the influence of friction stir welding parameters on the mechanical properties and electrical conductivity of welded joints [Issledovanie vliyaniya parametrov rezhima svarki treniem s peremeshivaniem medi na mekhanicheskie svoystva i elektroprovodnost' svarnyh soedinenij]. *Frontier Materials & Technologies*. 2022. No. 3. Pp. 50–60. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-3-1-50-60 (rus)

2. Sahlot P., Singh A. K., Badheka V., Arora A. Friction stir welding of copper: numerical modeling and validation. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72. No. 5. Pp. 1339–1347. DOI: 10.1007/s12666-019-01629-9
3. Singh G., Thakur A., Singh S., Sharma N. Friction stir welding of copper: Processing and multi-objective optimization. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2020. Vol. 27. No. 3. Pp. 709–716.
4. Shen J. J., Liu H. J., Cui F. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper. *Materials and Design*. 2010. Vol. 31. No. 8. Pp. 3937–3942. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.03.027
5. Hwang Y. M., Fan P. L., Lin C. H. Experimental study on Friction Stir Welding of copper metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. No. 12. Pp. 1667–1672. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019
6. Farrokhi H., Heidarzadeh A., Saeid T. Frictions stir welding of copper under different welding parameters and media. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013. Vol. 18. No. 8. Pp. 697–702. DOI: 10.1179/1362171813Y.0000000148
7. Antroshchenko V. V. [et al.]. Current state and prospects of development of friction stir welding of copper products [Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya svarki izdelij iz medi treniem s peremeshivaniem]. *Welding and Diagnostics*. 2021. No. 2. Pp. 39-42. DOI: 10.52177/2071-5234_2021_02_39
8. Kumar A., Raju L. S. Influence of tool pin profiles on friction stir welding of copper. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. Vol. 27. No. 12. Pp. 1414–1418. DOI: 10.1080/10426914.2012.689455
9. Selivanov A. S. [et al.]. Peculiarities of joint formation at friction stir welding of copper [Osobennosti formirovaniya soedinenii pri svarke treniem s peremeshivaniem medi]. *Innovacionnoe i cifrovoe mashinostroenie: materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Stankostroenie i cifrovoe mashinostroenie», Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya svarochnogo proizvodstva Rossii»*. Ufa : USATU. 2021. URL: https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf.
10. Nakata K. Friction stir welding of copper and copper alloys. *Welding International*. 2005. No. 19 (12). Pp. 929–933.
11. Sotnikov A. L. [et al.]. Development of welding tools and welding modes for MI copper electrical busbars by friction stir welding method [Razrabotka svarochnogo instrumenta i rezhimov svarki elektrotehnicheskikh shin iz medi MI sposobom svarki treniem s peremeshivaniem]. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2023. No. 6. Pp. 40–45. DOI: 10.34641/SP.2023.1063.6.051
12. Pashazadeh H., Teimournezhad J., Masoumi A. Numerical investigation on the mechanical, thermal, metallurgical and material flow characteristics in friction stir welding of copper sheets with experimental verification. *Materials and Design*. 2014. No. 55. Pp. 619–632.
13. Lee W.-B., Jung S.-B. The joint properties of copper by friction stir welding. *Materials Letters*. 2004. Vol. 58. No. 6. Pp. 1041–1046. DOI: 10.1016/j.matlet.2003.08.014
14. Verma S. M., Misra J. P. A Critical Review of Friction Stir Welding Process. *DAAAM International Scientific Book*. Vienna, Austria : DAAAM International. 2015. Chapter 22. Pp. 249–266. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2015.22
15. Xiel G. M., Ma Z. Y., Geng L. Effects of Friction Stir Welding Parameters on Microstructures and Mechanical Properties of Brass Joints. *The Japan Institute of Metals : Materials Transaction*. 2008. Vol. 49. No.7. Pp. 1698–1701.
16. Lee W., Jung S. B. The joint properties of copper by friction stir welding. *Materials Letters*. 2004. No. 58. Pp. 1041–1046.
17. Khodaverdizadeh H., Mahmoudi A., Heidarzadeh A., Nazari E. Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behaviour of pure copper joints. *Materials and Design*. 2012. No. 35. Pp. 330–334.
18. Lin W. J., Chang H. C., Wu M. H. Comparison of mechanical properties of pure copper welded using friction stir welding and tungsten inert gas welding. *J. of Manufacturing Processes*. 2014. No. 16. Pp. 296–304.

19. Meran C. *The Joint Properties of Brass Plates by Friction Stir Welding*. *Materials & Design*. 2006. No. 27. Pp. 719–726.
20. Akbar Heidarzadeh, Tohid Saeid. *On the effect of β phase on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded commercial brass alloys*. *Data in Brief*. 2015. Pp. 1022–1025.
21. Siva S., Sampathkumar S., Sudha J., Anirudh R. M. *Effect of Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Cast Nickel Aluminum Bronze Alloy (C95800)*. *Materials Research*. 2018. No. 21 (3) : e20170603. 13 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0603>
22. Lim Y., Lee K., Moon S. *Effects of a Post-Weld Heat Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of a Friction-Stir-Welded Beryllium-Copper Alloy*. *Metals*. 2019. No. 9 (461). 14 p. DOI: 10.3390/met9040461
23. Heidarzadeh A. [et al.] *Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution*. *Progress in Materials Science*. 2021. No. 117. 100752. 68 p.
24. Hamid Reza Sadeghi, Kamran Amini, Farhad Gharavi. *Effect of tool offset on microstructure and mechanical properties of dissimilar copper-brass friction stir welding*. *Metall. Res. Technol*. 2021. No. 118. 307. 9 p.
25. Farhad Gharavi, Iman Ebrahimzadeh, Kamran Amini, Pourya Darya. *Evaluation of the microstructure and mechanical properties of friction stir-welded copper/brass dissimilar joints*. *Materials Research Express*. 2018. No. 5 (7). 076517. 19 p. DOI: 10.1088/2053-1591/aacf20
26. Sorensen C. D., Nelson T. W. *Friction Stir Welding of Ferrous and Nickel Alloys*. *Friction Stir Welding and Processing*. 2007. 05112G. Pp. 111–121.
27. Hari Venkit, Senthil Kumaran S. *A review on friction stir welding of inconel alloys*. *Journal of Critical Reviews*. 2020. Vol. 7. Iss. 19. Pp. 4361–4371.
28. Kumar C. V., Muthukumaran S., Pradeep A., Senthil K. S. *Optimization study of friction welding of steel tube to aluminum tube plate using an external tool process*. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2011. Vol. 6–2. Pp. 300–306.
29. Ye F., Fujii H., Tsumura T. *Friction stir welding of Inconel alloy 600*. *J. Mater. Sci*. 2006. Vol. 41 (16). Pp. 5376–5379.
30. Song K. H., Nakata K. *Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of friction stir welded Inconel 600*. *Mater. Design*. 2009. Vol. 30 (10). Pp. 3972–3978.
31. Song K., Chung Y., Nakata K. *Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Jointed Inconel 600/SS 400*. *Metals and Materials International*. 2012. Vol. 35. Pp. 126–132.
32. Song K. H., Nakata K. *Effect of precipitation on post heat-treated Inconel 625 alloy after friction stir welding*. *Mater. Design*. 2010. Vol. 31 (6). Pp. 2942–2947.
33. Song K. H., Nakata K. *Mechanical properties of friction stir welded Inconel 625 alloy*. *Mater. Trans*. 2009. Vol. 50 (10). Pp. 2498–2501.
34. Senthil Kumaran S., Muthukumaran S., Chandrasekhar R. C. *Suitability of friction welding of tube to tube plate using an external tool process for different tube diameters. A study*. *Experimental Techniques*. 2013. Vol. 37 (6). Pp. 8–14.
35. Lemos G. V. B., Farina A. B., Martinazzi D. *O efeito da velocidade de rotação da ferramenta na soldagem por fricção e mistura mecânica da liga inconel 625*. *ABM Week : 71º Congresso Anual ABM*. Rio de Janeiro. 2016. DOI: 10.5151/1516-392X-28078
36. Ahmed M. M. Z., Wynne B. P., Martin J. P. *Effect of friction stir welding speed on mechanical properties and microstructure of nickel based super alloy Inconel 718*. *Sci Technol Weld Join*. 2013. Vol. 18 (8). Pp. 680–687.
37. Das H., Mondal M., Hong S. T., Lee J. W., Cho H. H. *Texture and precipitation behavior of friction stir welded Inconel 825 alloy*. *Materials Today Communications*. 2020. No. 25 (5) :101295.
38. Song K. H., Tsumura T., Nakata K. *Development of microstructure and mechanical properties in laser-FSW hybrid welded Inconel 600*. *Mater. Trans*. 2009. Vol. 50 (7). Pp. 1832–1837.
39. Guilherme Vieira Braga Lemos [et al.]. *Mitigating the susceptibility to intergranular corrosion of alloy 625 by friction-stir welding*. *Scientific Reports*. 2022. No. 12 : 3482. 10 p.

40. Heidarzadeh A., Ali Chabok, Reza Taherzadeh Mousavian, Yutao Pei. High-resolution EBSD characterisation of friction stir welded nickel-copper alloy: effect of the initial microstructure on microstructural evolution and mechanical properties. *Philosophical Magazine*. 2020. No. 100 : 3. Pp. 337–352. DOI: 10.1080/14786435.2019.1680889
41. Yue Zh., Yutaka S. S., Kokawa H., Wu A. Microstructure and properties of friction stir welded high strength Fe–36 wt%Ni Alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2011. No. 528. Pp. 7768–7773.
42. Nan Xu, Qining Song, Ye-feng Bao. Microstructure and mechanical properties' modification of friction stir welded Invar 36 alloy joint. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2019. No. 24 : 1. Pp. 79–82. DOI: 10.1080/13621718.2018.1490104
43. Jasthi B. K., Arbegast W. J., Howard S. M. Thermal Expansion Coefficient and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Invar (Fe-36%Ni). *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009. No. 18. Pp. 925–934. DOI: 10.1007/s11665-008-9320-7
44. Parker W. [et al.]. Part I: Friction stir welding of equiatomic nickel titanium shape memory alloy — microstructure, mechanical and corrosion behavior. *Journal of Advanced Joining Processes*. 2021. No. 4. 100071. 18 p. DOI: 10.1016/j.jajp.2021.100071
45. Mani Prabu S. S., Palani I. A. Investigations on the actuation behaviour of friction stir-welded nickel titanium shape memory alloy using continuous fibre laser. *Journal of Micromanufacturing*. 2022. No. 5 (2). Pp. 137–143. DOI: 10.1177/25165984211015409
46. Bataeva Z. B. Review of research on alloys developed using the entropy approach [Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода] *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2021. Vol. 23. No. 2. Pp. 116–146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146
47. Richter T., Schroepfer D., Rhode M. Residual Stresses in a High- and a Medium-Entropy Alloy due to TIG and Friction Stir Welding. *J. Manuf. Mater. Process*. 2022. No. 6. 147. 11 p. DOI: 10.3390/jmmp6060147

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Yuri Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

Denisova Natalia Anatolievna, PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Petrov Pavel Aleksandrovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: pavelpetrov@list.ru

Orlov Andrei Andreievich, Assistant Lecturer of the Department of Metallurgical Complex Machines
Donbass State Technical University
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru

Братцев В. Г., *Кучма С. Н.

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: kuchmalana@mail.ru*

НАПЛАВКА ШТАМПОВ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ПРИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ РЕМОНТЕ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ

В статье предложен метод повышения стойкости штампов горячей штамповки, изготовленных из инструментальной штамповой стали 5ХНМ, при их восстановлении и даны рекомендации по их наплавке. Приведены результаты по итогам эксплуатации штампов, подтверждающие увеличение их стойкости, снижение затрат на оснастку при использовании наплавки.

Ключевые слова: *штампы горячей штамповки, восстановление, стойкость, износостойкость, теплостойкость, наплавка, наплавочные электроды, трещины разгара, чеканочные штампы, формовочные матрицы.*

Штампы горячей штамповки выводятся из эксплуатации вследствие недопустимого износа, трещин разгара, поверхностного выкрашивания, деформаций формообразующих элементов.

Ремонт и восстановление штампов выполняются механической, абразивной, электроэрозионной обработкой, наплавкой спецэлектродами.

Так как удаляемый при ремонте (восстановлении) слой металла может превосходить глубину рабочего профиля, то, соответственно, это ведёт к уменьшению запаса по толщине (высоте) для последующих ремонтов.

Наплавка изношенных элементов гравюры позволяет скомпенсировать часть удаленного металла. Полученный наплавленный слой, как правило, превосходит исходную сталь (сталь штампа) по теплостойкости, износостойкости за счет содержащихся в нем карбидов молибдена, хрома, других легирующих элементов.

Таки образом, в итоге увеличивается стойкость штампов, снижаются затраты на изготовление новых штампов и на переналадку.

Целесообразность введения наплавки в технологический процесс ремонта определяется по результатам исследования эксплуатации опытных образцов на конкретных операциях штамповки.

Штампы горячего деформирования работают в тяжелых условиях, сочетающих высокое удельное давление, абразивный износ с нагревом гравюры свыше 400 °С.

Требованиям прочности, теплостойкости, окалинотойкости, износостойкости наиболее полно удовлетворяют стали, легированные молибденом, никелем, вольфрамом и ванадием. Увеличение содержания указанных легирующих элементов значительно повышает стоимость штамповой оснастки. Как правило, усложняется механическая и термическая обработки.

У малых и средних предприятий, помимо технологических ограничений, дефицита оборотных средств, есть сложности с закупкой небольших объемов заготовок средне- и высоколегированных штамповых сталей.

Перечисленные проблемы обуславливают актуальность применения низколегированных, хорошо освоенных доступных марок сталей в сочетании с методами, повышающими их эксплуатационные свойства.

В данной работе исследуются результаты эксплуатации двух типов штампов горячей штамповки, изготовленных из инструментальной штамповой стали 5ХНМ, сочетающей удовлетворительные эксплуатационные свойства с технологичностью и приемлемой стоимостью.

Цель настоящей работы — разработка технологии восстановления изношенных штампов горячей штамповки из сталей 5ХНМ, 5ХГМ методом наплавки электродами марок ЭН-60М, ОЗШ-3.

Объект исследования — технологический процесс восстановления изношенных штампов горячей штамповки из инструментальной штамповой стали 5ХНМ.

Предмет исследования — целесообразность применения наплавки наплавочными электродами марок ЭН-60М и ОЗШ-3 для восстановления изношенных штампов горячей штамповки из стали 5ХНМ.

Задачи исследования:

– разработка технологического процесса наплавки изношенных штампов из стали 5ХНМ и последующей обработки;

– проведение сравнительного анализа эффективности применения электродов марок ЭН-60М и ОЗШ-3 для разных типов штампов;

– выполнение сравнительного анализа результатов эксплуатации штампов без наплавки и восстановленных штампов методом наплавки электродами ЭН-60М и ОЗШ-3.

Исследование технологии восстановления изношенных штампов горячей штамповки, изготовленных из инструментальных штамповых сталей 5ХНМ и 5ХГМ, проводили на прессовом участке ООО «Завод Прогресс-2000». Восстановление изношенных поверхностей штампов выполнялось методом наплавки наплавочными электродами марки ЭН-60М производства ООО «СЗСМ» и марки ОЗШ-3 производства «НПО Спецэлектрод».

Исследования проводились на изношенных формовочных матрицах горизонтально-ковочной машины (ГКМ) и чеканочных штампах.

Твёрдость измерялась на приборе ТК-2М. Глубина износа измерялась от зеркала штампа глубиномерами ГМ100-2 ГОСТ 7470-92, ГИ-100 ГОСТ 7661-67.

Для изготовления штампов горячей штамповки широко применяются инструментальные штамповые стали марок

5ХНМ, 5ХГМ. Данные стали сочетают требуемые механические характеристики с хорошей обрабатываемостью резанием, умеренной стоимостью заготовок [1].

Высокая прокаливаемость обеспечивает равномерность свойств по сечению штампа. Стали не склонны к образованию закалочных трещин, отпускной хрупкости, но разгаростойкость, окалиностойкость, теплоустойчивость ограничены рабочим диапазоном 400–500 °С. Износостойкость зависит от твердости и размера зерна, полученных после термообработки, эксплуатационной температуры нагрева, приводящей к отпуску [2].

Химический анализ проката и поковок, приобретаемых в качестве заготовок штампов, показывает, что содержание никеля, молибдена, хрома соответствует нижним допустимым значениям по стандарту. При изготовлении заготовок штампов ковкой, помимо обезуглероживания при нагреве, происходят потери молибдена в окалине (Fe_2MoO_4) и летучих оксидах (MoO_3) [3]. Причем чем выше степень укова, тем более глубокие слои затрагивает процесс. Это приводит к снижению теплостойкости и износостойкости штампов. Для удаления обезуглероженного, обедненного легирующими элементами слоя приходится увеличивать припуск на окончательную механическую обработку после заковки до 1,5–2,0 мм.

Заменители сталей 5ХНМ и 5ХГМ, не содержащие дорогостоящие никель и молибден, например, 5ХГС, 5ХЗГС, 5ХВГ, 35ХГСА, 7ХЗ, уступают или вовсе не подходят по комплексу свойств для универсальной замены. Кроме того, для них требуется проведение более сложной термообработки.

Переход на марки сталей повышенной теплостойкости, содержащие вольфрам и ванадий, такие как 4Х5В2ФС, 3Х2В8Ф, позволяет решить проблему повышения стойкости штампов горячей штамповки. Однако использование этих сталей увеличивает затраты на материал и изготовление [4].

В условиях среднесерийного производства в качестве альтернативного метода повышения стойкости штампов горячей

штамповки целесообразно рассмотреть наплавку нагруженных элементов профиля штампов во время восстановления или в процессе их изготовления [5–7].

Для наплавки штампов из стали 5ХНМ наиболее подходящими по химическому составу (табл. 1) являются наплавочные электроды марки ЭН-60М. Эти электроды служат для наплавки штампов всех типов, которые работают с нагревом контактных поверхностей до температуры $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По данным изготовителей, после наплавки без дополнительной термообработки обеспечивается твердость 53–61 HRC. Такая высокая твердость объясняется образующимися при наплавке карбидами хрома Cr_3C_2 и молибдена Mo_2C .

Данной маркой электродов наплавлялись восстанавливаемые штампы, применяемые при изготовлении подвески триангеля (рис. 1) на прессовом участке ООО «Завод Прогресс-2000».

Таблица 1

Химический состав электродов ЭН-60М производства ООО «СЗСМ»

Название элемента	Массовая доля элементов, %
Углерод	0,500–0,900
Хром	2,300–3,200
Марганец	0,400–1,000
Молибден	0,300–0,700
Фосфор	$\leq 0,035$
Сера	$\leq 0,030$
Кремний	0,800–1,200



Рисунок 1 — Подвеска триангеля в сборе

На рисунке 2 представлена изношенная формовочная матрица на ГКМ, а на рисунке 3 — изношенный чеканочный штамп.

Средняя твердость наплавленного слоя составила 54–56 HRC. Полученный слой однородный, без газовых пузырей и шлаковых включений (рис. 4).



Рисунок 2 — Изношенная формовочная матрица на ГКМ



Рисунок 3 — Изношенный чеканочный штамп



Рисунок 4 — Наплавленная электродами ЭН-60М формовочная матрица ГКМ

На формовочных матрицах ГКМ наблюдался интенсивный износ наплавленных участков облойного мостика (до 2 мм), знака, радиусного перехода к зажимной части (до 2 мм) после пяти смен работы. Трещины разгара на передней части облойного мостика и знаке образовывались уже после второй смены. На восстановленном наплавкой чеканочном штампе, установленном на кривошипно-коленном прессе, интенсивный износ не развивался. Замеры твердости изношенных участков показали снижение твердости до 40–45 HRC, что подтверждает произошедший в процессе работы штампа отпуск вследствие недостаточной теплоустойчивости наплавленного металла. Поэтому было принято решение заменить марку наплавочных электродов на ОЗШ-3 (химический состав представлен в табл. 2), предназначенные для наплавки штампов горячей штамповки с температурой нагрева рабочих поверхностей до 650 °С.

После этого был выполнен ремонт наплавкой формовочных матриц ГКМ и чеканочных штампов. На рисунках 5 и 6 представлены наплавки формовочной матрицы ГКМ и чеканочного штампа электродами ОЗШ-3 соответственно.

Таблица 2

Химический состав электродов ОЗШ-3 производства ООО «НПО Спецэлектрод»

Название элемента	Массовая доля элементов, %
Углерод	0,3–0,5
Хром	8,0–11,0
Марганец	0,4–1,0
Фосфор	≤0,027
Сера	≤0,017
Кремний	1,4–2,8



Рисунок 5 — Третья наплавка формовочной матрицы ГКМ электродами ОЗШ-3



Рисунок 6 — Наплавка чеканочного штампа электродами ОЗШ-3

В процессе эксплуатации выявлено преимущество использования наплавочных электродов ОЗШ-3 при восстановлении формовочных матриц ГКМ, сходные с ЭН-60М результаты для чеканочных штампов.

Технология наплавки и последующей обработки. Участки матриц под наплавку подвергались очистке до блеска пневмошлифмашинкой. Глубокие трещины разгара разделялись до корня отрезным кругом с помощью УШМ. Зачистным кругом зачищались от окалины внешние нерабочие грани для надёжного контакта с заземляющей клеммой. Все поверхности обдувались сухим сжатым воздухом.

Непосредственно перед наплавкой матрицы нагревались в отпускной печи сопротивления до 230–250 °С с выдержкой в течение часа. Наплавка выполнялась по нагретому металлу.

Электроды применялись из герметичной упаковки или после прокалки, остывания до 50–70 °С. Режим прокалки принимался в соответствии с рекомендациями изготовителя по верхней границе нагрева.

Неиспользованные электроды перед следующей наплавкой повторно прокаливались. Третья прокалка не проводилась, так как наблюдалось растрескивание покрытия. Участки без наплавки защищались размятым асбестовым листом. На рисунке 7 показана подготовка под наплавку.



Рисунок 7 — Подготовка под наплавку

Для наплавки применялись электроды диаметром 3 мм, позволяющие заваривать как локальные дефекты, так и наплавлять участки большой площади.

Наплавку выполняли в один или два слоя. Перед наплавкой второго слоя первый горячим тщательно зачищался щеткой, подравнивался УШМ. На вертикальных участках фигуры применялись продольные швы с перекрытием смежных на треть ширины валика. Горизонтальные участки наплавлялись поперечными швами с движением электрода полумесяцем [8].

Наплавку электродами ЭН-60М производили при токе 105–110 А, ОЗШ-3 — 115–120 А. Наплавку вели на обратной полярности. Сварочный инвертор NEON ВД-221.

По возможности располагали деталь для формирования швов горизонтальных или «в лодочку». Для предупреждения шлаковых включений, пористости обрыв дуги следует выполнять, не доводя электрод до края участка, давая сформироваться валику за счет отстающей ванны расплава.

Наплавленный электродами ОЗШ-3 металл при нарушениях в прокалке остывшей детали имеет газовую пористость (рис. 8).



Рисунок 8 — Газовая пористость после наплавки ОЗШ-3

Наблюдениями установлено: газовые поры округлой формы в основном не являются очагом зарождения трещин. Эксплуатация показала, что мелкие единичные дефекты не копируются на поверхность штамповки, не препятствуют её извлечению из штампа. Поэтому единичные поры размером менее 1 мм можно считать допустимыми.

После завершения наплавки матрицы подвергались отпуску в электрической печи при температуре 200 °С с выдержкой в течение 2 часов и последующим охлаждением с печью до 100 °С.

Высокая твердость наплавленного слоя не позволяла применить фрезерование, растачивание для окончательной обработки в виду частых сколов твердосплавного инструмента. Черновая обработка выполнялась сработанными зачистными кругами, подбираемыми по размещению в криволинейном профиле. Точность обработки 0,1–0,15 мм, припуск под обработку пневмошлифмашинкой не более 0,2 мм. Чистовая обработка производилась пневмошлифмашинкой абразивными кругами и наждачными бандажами с точностью по глубине 0,03–0,05 мм.

При износе штампов действуют общие закономерности для стадий износа. В период приработки после первой, второй смены работы обязательно выполнялось удаление наплывов на радиусных кромках, сглаживание вспучиваний у микротрещин. При своевременном купировании дефекты в период нормальной работы оставались неизменными или развивались медленно.

Целесообразно не доводить штамп до третьей стадии (рис. 9), отправлять на ремонт. Глубина дефектного слоя на третьей стадии износа существенно возрастает, сетка усталостных термомеханических трещин приводит к выкрашиванию, нарушению связи между наплавленным и основным металлом.

Результаты. Стойкость формовочных матриц ГКМ, восстановленных наплавкой электродами марки ОЗШ-3, увеличилась в 1,5 раза.



Рисунок 9 — Третья стадия износа

Восстановление штампов позволило повысить стойкость между ремонтами с 3,5–5 тысяч штамповок до 8–10 тысяч. Необходимо отметить, что исходные размеры радиусных элементов фигуры сохранились дольше, улучшились стабильность размеров и качество поверхности штамповок.

Ремонт наплавкой формовочных матриц ГКМ выполнялся обычно дважды, после чего матрица отжигалась. При достаточной высоте фрезеровалась в заготовку для повторного изготовления.

Чеканочные штампы подвергались наплавке после достижения минимальной высоты на предыдущих ремонтах перепрожигом на электроэрозионном станке. Проводилось два или три ремонта наплавкой. Происходящие изменения в структуре основного металла в дальнейшем приводили к образованию сетки трещин и выкрашиванию.

Технологический процесс ремонта изменен с учетом высокой твердости наплавленного металла. Недостатком является увеличение времени и объема слесарной обработки, требующее достаточно высокой квалификации (табл. 3). Однако исключены операции перепрожига на электроэрозионном станке и слесарная по ремонту электродов.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 3

Сравнительный анализ затрат времени на ремонт комплекта чеканочных матриц

Техпроцесс ремонта комплекта чеканочных матриц (2 шт.) перепрожигом		Техпроцесс ремонта комплекта чеканочных матриц (2 шт.) наплавкой	
Операция	Норма времени, ч	Операция	Норма времени, ч
Фрезерная	1	Фрезерная	1
Электроэрозионная	16	Наплавочная	8
Слесарная (ремонт электродов)	16	Термическая	4
Плоскошлифовальная	2	Слесарная	16
Слесарная	16	Плоскошлифовальная	2
		Слесарная	16
		Плоскошлифовальная	1
Итого	51	Итого	48

Применение УШМ позволило в несколько раз ускорить черновую обработку. По производительности УШМ сопоставима с фрезерованием концевыми твердосплавными фрезами.

Общая стойкость чеканочных штампов возросла с 25–30 тысяч до 50–55 тысяч штамповок. Экономия средств при использовании восстановленного комплекта чеканочных матриц составила до 70 % стоимости новых.

Список источников

1. Поздняк Л. А., Скрынченко Ю. М., Тишаев С. И. Штамповые стали. М. : Металлургия, 1980. 244 с.
2. Исследование структуры свойств штамповых инструментальных сталей / Т. А. Богданова, А. А. Перебоева, Л. П. Третьякова, Н. В. Окладникова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2009. № 2 (23). С. 239–241.
3. Исследование высокотемпературного окисления и обезуглероживания легированных сталей марок 40ХН, 34ХН1М, 5ХНМ при нагреве под обработку давлением / О. Л. Базайкина, М. В. Темлянцев, С. А. Казимиров, Е. М. Запольская // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2013. № 2 (4). С. 13–17.
4. Варинская Л. А., Лазечный И. Н. Предварительная оценка экономической целесообразности замены материала штампового инструмента // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2006. № 1. С. 90–93.
5. Ковка и штамповка : справочник: в 4 т. / под ред. Е. И. Семенова. М. : Машиностроение, 1986. Т. 2 : Горячая штамповка. 592 с. : ил.
6. Хомяк Б. С. Пути повышения износостойкости прессового инструмента. М. : ВНИИТЭМР, 1986. 68 с.
7. Разработка технологии восстановления рабочей гравюры штампового инструмента / И. Р. Мухаметзянов, Г. Ф. Мухаметзянов, В. И. Астащенко, Г. Ф. Мухаметзянова // Вестник Югорского государственного университета. 2023. Вып. 3. С. 166–172.
8. Ерофеев В. А., Захаров С. К., Кузнецов О. В. Особенности технологии дуговой наплавки упрочняющих слоев на стальную подложку // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч. 1. С. 132–138.

© Братцев В. П., Кучма С. Н.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф.,
проректором по научной работе ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А.,
к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М.*

Статья поступила в редакцию 20.06.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Братцев Виталий Геннадьевич, младший научный сотрудник ОИЦ «Станкоинструментальное обеспечение машиностроительного производства»
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Кучма Светлана Николаевна, канд. техн. наук, доцент каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: kuchmalana@mail.ru

Bratcev V. G., *Kuchma S. N. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: kuchmalana@mail.ru)

SURFACING OF HOT STAMPING DIES DURING RESTORATIVE REPAIRS IN ORDER TO INCREASE DURABILITY

The article proposes a method for increasing the durability of hot stamping dies made of 5HNM, tool die steel during their restoration and provides recommendations for their surfacing. The results of the operation of the stamps are presented, confirming an increase in their durability, reducing the cost of tooling when using surfacing.

Key words: hot stamping dies, restoration, durability, wear resistance, heat resistance, surfacing, surfacing electrodes, heat cracks, stamping dies, forming dies.

References

1. Pozdnyak L. A., Skrynchenko Yu. M., Tishaev S. I. Die steels [Shtampovye stali]. M. : Metalurgija, 1980. 244 p. (rus)
2. Bogdanova T. A., Pereboeva A. A., Tret'yakova L. P., Okladnikova N. V. Study the structure of properties of the die chisel steels [Issledovanie struktury svojstv shtampovyh instrumental'nyh stalej]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva. 2009. No. 2 (23). Pp. 239–241. (rus)
3. Bazajkina O. L., Temlyancev M. V., Kazimirov S. A., Zapol'skaya E. M. Study of high-temperature oxidation and decarburization of alloyed steels of grades 40XH, 34XH1M, 5XHМ during heat treatment under pressure [Issledovanie vysokotemperaturnogo okisleniya i obezuglerozhivaniya legirovannyh stalej marok 40HN, 34HN1M, 5HNM pri nagreve pod obrabotku davleniem]. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2013. No. 2 (4). Pp. 13–17. (rus)
4. Varinskaya L. A., Lazechnyj I. N. Preliminary assessment of the economic feasibility of replacing the die material [Predvaritel'naya ocenka ekonomicheskoy celesoobraznosti zameny materiala shtampovogo instrumenta]. Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii.. 2006. No. 1. Pp. 90–93. (rus)
5. Forging and dying : handbook: in 4 vol. [Kovka i shtampovka : spravochnik: v 4 t.] eds. E. I. Semenov. M. : Mashinostroyeniye, 1986. Vol. 2. Goryachaya shtampovka. 592 p. : illus. (rus)
6. Номыак В. С. Ways of increasing wear resistance of press tools [Puti povysheniya iznosostojkosti pressovogo instrumenta]. M. : VNIITEMR, 1986. 68 p. (rus)
7. Muhametzyanov I. R., Muhametzyanov G. F., Astashchenko V. I., Muhametzyanova G. F. Development of working engrave dying tool recovery technology [Razrabotka tekhnologii

vosstanovleniya rabochej gravury shtampovogo instrumenta]. Yugra State University Bulletin. 2023. Iss. 3. Pp. 166–172. (rus)

8. Erofeev V. A., Zaharov S. K., Kuznecov O. V. Features of arc surfacing technology hardening layers on steel substrate [Osobennosti tekhnologii dugovoj naplavki uprochnyayushchih sloev na stal'nyu podlozhku]. Izvestiya TulGU. Technical sciences. 2014. Iss. 11. Pt. 1. Pp. 132–138. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bratsev Vitaly Gennadievich, Junior Researcher of JRC “Machine-tool design provision of mechanical facilities”

Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia

Kuchma Svetlana Nikolayevna, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Technology and Machine-building Production

Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia
e-mail: kuchmalana@mail.ru

СТРОИТЕЛЬСТВО

CIVIL ENGINEERING

УДК 69.07 + 004.942

EDN: CWDIPG

Никишина И. А., Бондарчук В. В.Донбасский государственный технический университет***E-mail: niki1.ir@yandex.ru***МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ
С БЕЗРИГЕЛЬНЫМ КАРКАСОМ В ПК «САПФИР»**

В работе приведена процедура создания архитектурной и аналитической модели многоэтажного здания с безригельным каркасом в ПК «САПФИР», показана технология создания конечно-элементной расчетной схемы в системе «САПФИР-КОНСТРУКЦИИ» для дальнейшей передачи в систему «ВИЗОР-САПР».

Ключевые слова: моделирование, многоэтажное здание, безригельный каркас, ПК «САПФИР», ПК «ЛИРА», аналитическая модель, архитектурная модель, расчетная схема, конечно-элементная модель.

Интенсивное развитие строительных технологий, жесткая конкуренция, высокие требования к срокам и качеству проектных работ — эти и другие факторы современного рынка обуславливают необходимость повышения уровня автоматизации, совершенствования используемых инструментов, применения в инженерной практике новых приемов и методов построения моделей.

Несмотря на большое количество программных комплексов архитектурного проектирования, большинство из них не способны создать адекватную компьютерную модель объекта, отвечающую различным требованиям управления жизненным циклом строительного объекта, не способны выполнить экспорт созданной компьютерной модели в расчетные программные комплексы, выполнить корректный подсчет объемов в привязке к действующим нормативам и т. д.

В монографии [1] М. С. Барабаш четко показал взаимосвязь между архитектурной и конструктивной частями проекта, реализуемыми в ПК «САПФИР».

Важнейшим вопросом САПР в строительстве становится преобразование сложной архитектурной модели, насыщенной всевозможными архитектурными деталями и элементами, носящими зачастую декоративный характер, в строгую расчетную схему. Это выполняет подсистема «САПФИР-

КОНСТРУКЦИИ», позволяющая максимально приблизить архитектурную модель, созданную в любом программном комплексе, к расчетной схеме, полностью готовой для расчета в программном комплексе «ЛИРА-САПР», в котором после небольшой доработки выполняется расчет и проектирование конструкций.

Не только архитектор, но и конструктор может успешно работать с программой. Используя возможности трехмерного редактора «САПФИР», конструктор выполняет подготовку аналитической модели, на базе которой создается расчетная схема здания.

Хотя архитектор и конструктор тесно сотрудничают при работе, они тем не менее применяют различные подходы к моделированию строительных объектов. В связи с этим модели, созданные архитекторами, зачастую не могли непосредственно использоваться для прочностного анализа. Как правило, конструктор, чтобы выполнить расчет и анализ конструкций, создавал расчетную модель здания заново, с нуля. Результаты огромного труда, сделанного архитектором, воплотившиеся в многочисленных моделях, не могли быть полностью унаследованы.

Программа «САПФИР» радикально изменила ситуацию к лучшему. «САПФИР» объединяет архитектора и конструктора в работе над проектом благодаря реализован-

ному в ней дуальному представлению модели, суть которого заключается в том, что архитектурная и аналитическая модели обрабатываются совместно. Архитектор создает проект из различных элементов здания, оперируя их архитектурными моделями. При этом незаметно для себя он формирует и аналитическую модель. Это не требует никаких дополнительных усилий от пользователя, поскольку программа сама занимается актуализацией, синхронизацией и контролем корректности. На любом этапе можно переключить режим визуализации и увидеть аналитическое представление. Можно выделить несколько конструктивных элементов и визуально сопоставить оба представления модели на одном наглядном изображении. Более того, можно импортировать сетку конечных элементов из ПК «ЛИРА» и, переключая видимость объектов, производить визуальную верификацию адекватности расчетной схемы.

В связи с этим *цель* настоящей работы — показать процедуру создания архитектурной и аналитической модели многоэтажного здания в программе «САПФИР».

Объект исследования — многоэтажное здание с безригельным каркасом.

Задачи исследования:

– показать процедуру создания архитектурной и аналитической модели многоэтажного здания в программе «САПФИР»;

– показать технологию создания конечно-элементной расчетной схемы многоэтажного здания в системе «САПФИР-КОНСТРУКЦИИ» для дальнейшей передачи в систему «ВИЗОР-САПР».

В основе *методики исследований* лежит компьютерное моделирование в ПК «САПФИР» архитектурной модели многоэтажного здания с безригельным каркасом для визуализации и документирования проекта и получение аналитической модели в качестве геометрической основы для формирования расчетной схемы и последующего анализа напряженно-деформированного состояния конструкции в ПК «ЛИРА».

В качестве исследуемого объекта было выбрано многоэтажное здание с безригельным каркасом. План первого этажа и разрез представлены на рисунках 1 и 2 соответственно. Высота типового этажа 4 м. Количество этажей — 5. Отметка пола первого этажа — 0,000. Нормы расчета элементов — СНиП 2.03.01-84* [2]. Материал элементов: колонны, капители — бетон Б30; стены, плиты перекрытий, фундаментная плита — бетон В25. Размеры сечения колонн 0,6×0,8 м. Размеры капители: две ступени, $b \times h = 0,3 \times 0,2$ м. Толщина плиты перекрытия — 0,2 м. Размер утолщения плиты — 0,2 м. Толщина фундаментной плиты 0,6 м. Толщина стен — 0,2 м.

Нагрузки:

1. Загружение 1 — нагрузка от ограждающих стен — постоянная равномерно распределенная по линии $g_1 = 1,6$ тс/м, приложенная на плиты перекрытия по всем этажам; нагрузка от перегородки — постоянная равномерно распределенная по линии $g_2 = 1,6$ тс/м, приложенная на плиты перекрытия по всем этажам; нагрузка конструкций пола — постоянная равномерно распределенная по площади $g_3 = 0,3$ тс/м², приложенная на плиты перекрытия по всем этажам; нагрузка от конструкций покрытия — постоянная равномерно распределенная по площади $g_4 = 0,1$ тс/м², приложенная на плиту покрытия.

2. Загружение 2 — полезная нагрузка на плиты перекрытия $g_5 = 0,5$ тс/м², нагрузка штамп на плиты перекрытия $g_6 = 2,0$ тс/м².

Достижение вышеперечисленных задач выполнялось при помощи следующих действий:

1) создание сетки осей и уровней (этажей) здания (рис. 3);

2) моделирование несущих конструкций здания (рис. 4) с назначением материалов для каждой конструкции, таких как класс бетона, класс арматуры и класс огнестойкости;

3) сбор нагрузок на плиты перекрытия и покрытия [3] (рис. 5);

4) формирование таблиц расчетных сочетаний усилий (PCY);

СТРОИТЕЛЬСТВО

5) формирование аналитической модели происходит автоматически при создании физической модели [4]. Для получения корректной расчетной модели необходимо вы-

полнить пересечение стержней и пластин (рис. 6), а также произвести триангуляцию пластин (рис. 7). После этого модель готова к передаче в ПК «ЛИРА-САПР» для расчета.

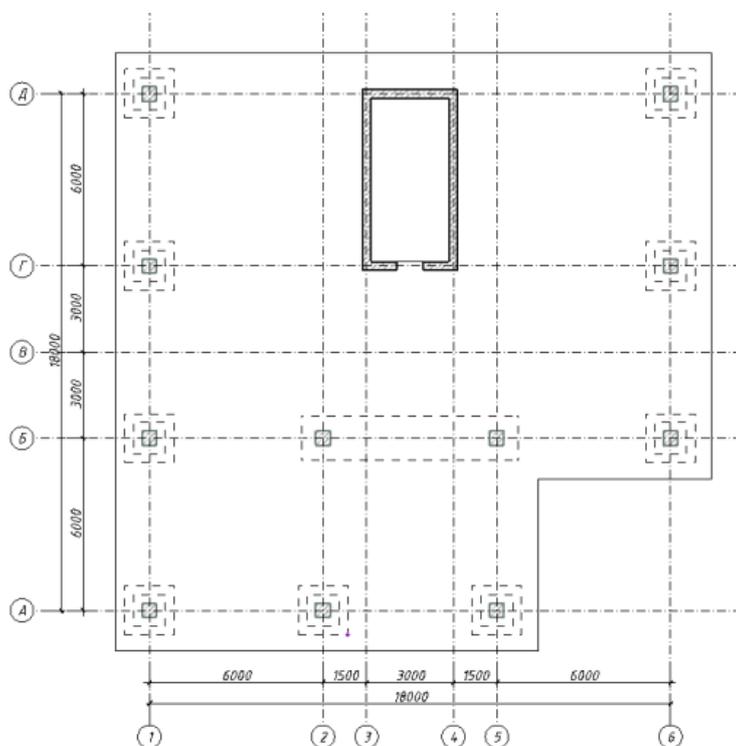


Рисунок 1 — План первого этажа пятиэтажного здания

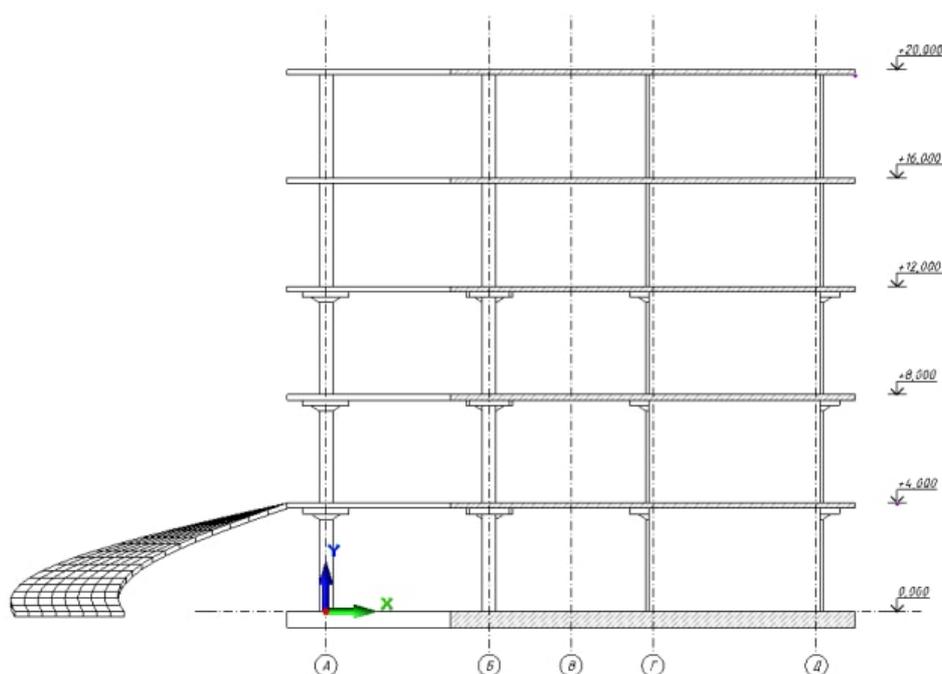


Рисунок 2 — Разрез пятиэтажного здания

СТРОИТЕЛЬСТВО

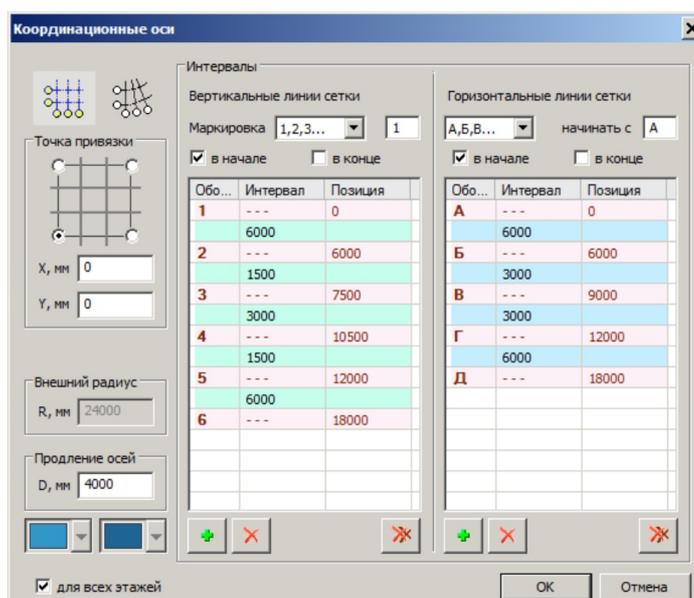


Рисунок 3 — Диалоговое окно «Координационные оси»

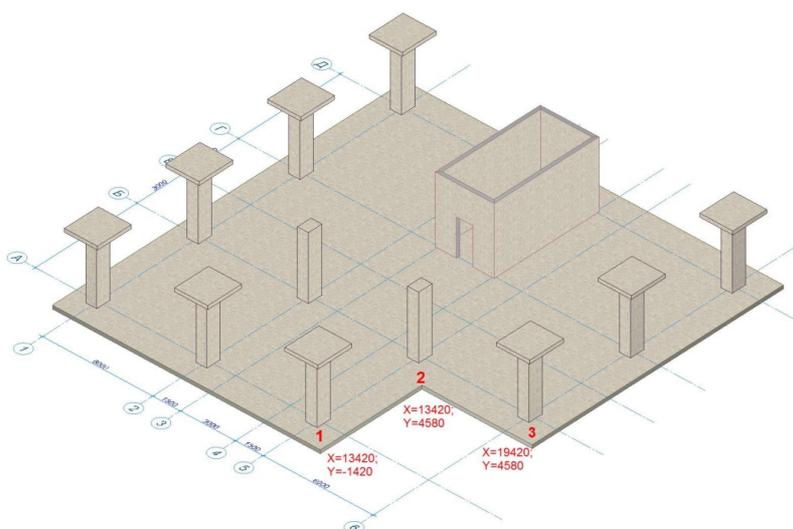


Рисунок 4 — Схема расположения колонн и стен, а также контур плиты после корректировки

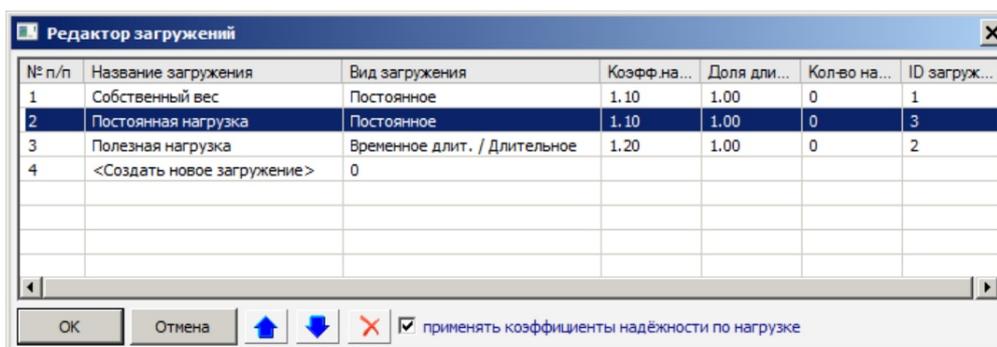


Рисунок 5 — Редактор загрузений

СТРОИТЕЛЬСТВО

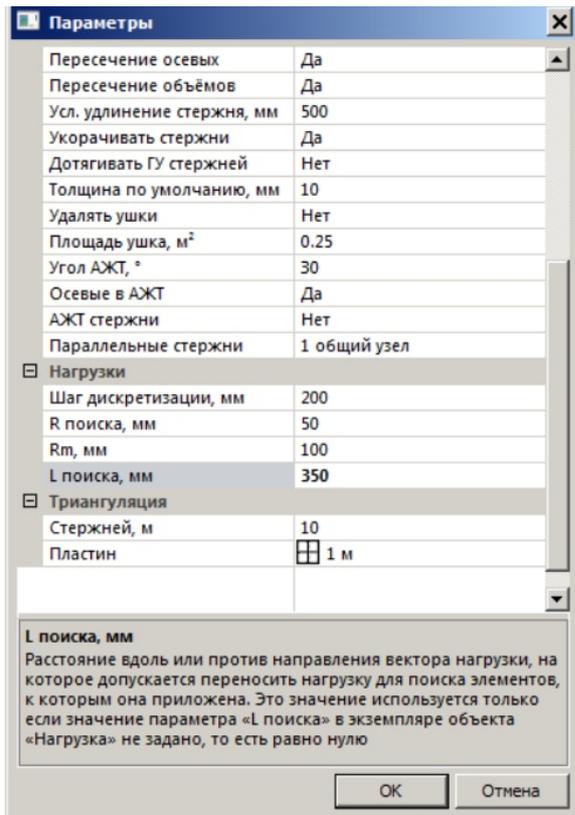


Рисунок 6 — Диалоговое окно «Параметры»

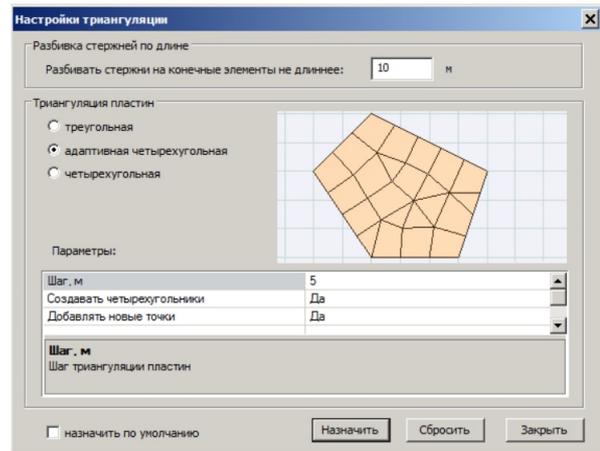


Рисунок 7 — Настройка триангуляции

После выполненного монтажа этажей расчетная модель с выполненными пересечениями будет иметь вид, показанный на рисунке 8.

Данная конечно-элементная модель готова к дальнейшему расчету в ПК «ЛИРА-САПР», где, благодаря встроенным модулям, возможны выполнение нелинейных расчетов, подбор арматуры, получение схемы расположения арматуры и всех необходимых чертежей марки КЖ.

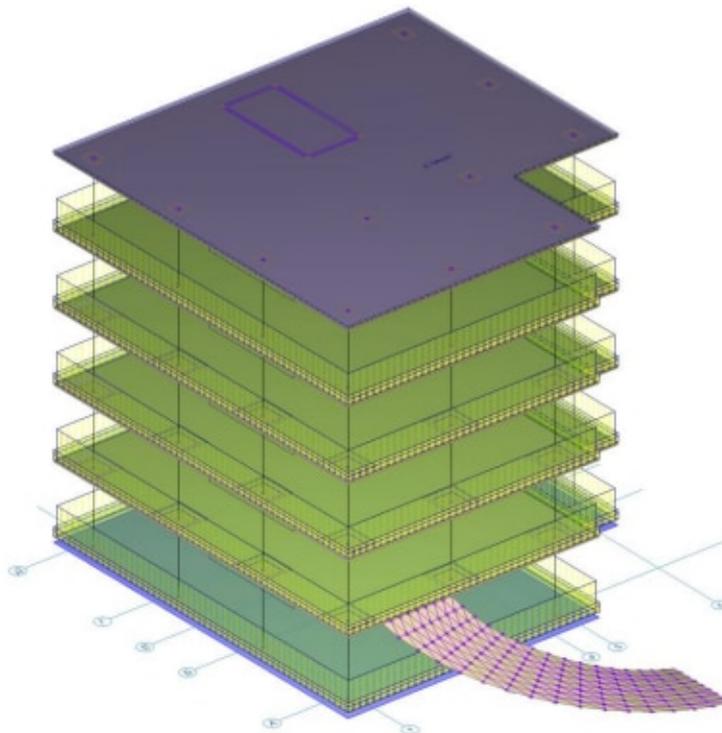


Рисунок 8 — Расчетная модель с выполненными пересечениями

Выполненные исследования позволили сделать следующие **выводы**:

1. Программа «САПФИР» предоставляет средства для работы с библиотекой материалов, в которой имеются бетон, сталь, кирпич, стекло и т. д., а также многослойные материалы. Для каждого материала в библиотеке указаны визуальные характеристики и физико-механические свойства. Визуализация осуществляется с использованием палитры цветов и текстур.

2. Построение элементов модели проектируемого здания производится графическими средствами на наглядных изображениях. При этом получается полностью параметризованная модель. Такая параметризация способствует высокой вариативности моделей, провоцирует многова-

риантное проектирование, облегчает творческий поиск оптимальных решений.

3. Аккуратность моделей достигается за счет высокой точности построений. При этом проектировщику помогают интеллектуальные механизмы позиционирования локатора ввода точек в трехмерном пространстве.

4. Необходимо дальнейшее изучение возможностей программы «САПФИР», построенной на базе мощного трехмерного параметрического ядра, представляющей собой удобный инструмент для архитектора, позволяющий эффективно решать задачи проектирования практически на всех стадиях — начиная от эскизов и проектного предложения, включая стадию «П», и заканчивая подготовкой рабочей документации для объектов строительства.

Список источников

1. Барабаш М. С., Медведенко Д. В., Палиенко О. И. Программные комплексы САПФИР и ЛИРА-САПР — основа отечественных ВМ-технологий : монография. 2-е изд. М. : Издательство Юрайт, 2013. 366 с. (Серия: Магистр).

2. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. 79 с.

3. Страхов Д. Е. Конструирование и расчет пространственного железобетонного каркаса многоэтажного монолитного здания с плитным фундаментом на упругом основании с применением программных комплексов САПФИР и ЛИРА-САПР : учеб.-метод. пособие. Казань : Изд-во Казан. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2018. 99 с.

4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 19.06.2024).

© Никишина И. А., Бондарчук В. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ИМС ДонГТУ Бревновым А. А., д.т.н., проф. каф. ПСО ЛГАУ им. К. Е. Ворошилова Давиденко А. И.

Статья поступила в редакцию 20.06.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Никишина Ирина Александровна, старший преподаватель каф. архитектурного дизайна и строительных конструкций
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: nikl.ir@yandex.ru

Бондарчук Владимир Витальевич, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. архитектурного дизайна и строительных конструкций
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

***Nikishina I. A., Bondarchuk V. V.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: nkl.ir@yandex.ru)

MODELLING A MULTI-STOREY GIRDERLESS OSSATURE BUILDING IN THE SP "SAPPHIRE"

The paper presents the procedure of creating an architectural and analytical model of a multi-storey girderless ossature building in the SP "SAPPHIRE", shows the technology of creating a finite-element computational scheme in the system "SAPPHIRE-CONSTRUCTIONS" for further transfer to the system "VISOR-SAPR".

Key words: modelling, multi-storey building, girderless ossature, SP "SAPPHIRE", SP "LIRA", analytical model, architectural model, computational scheme, finite-element model.

References

1. Barabash M. S., Medvedenko D. V., Palienko O. I. *SAPPHIRE and LIRA-SAPR programme software — underpinning domestic BIM- technologies : monograph. 2 ed. [Programmnye komplekсы SAPFIR i LIRA-SAPR — osnova otechestvennyh BIM-tekhnologij : monografiya. 2-e izd.]*. M. : Izdatel'stvo Yurajt, 2013. 366 p. (rus)

2. SNiP 2.03.01-84*. *Concrete and reinforced concrete constructions*. M. : CИTП Gosstroya SSSR, 1985. 79 p.

3. Strakhov D. E. *Design and calculation of the spatial reinforced concrete frame of a multi-storey monolithic building with a slab foundation on an elastic base using the software systems SAPPHIRE and LIRA-SAPR : a textbook [Konstruirovaniye i raschet prostranstvennogo zhelezobetonnoyo karkasa mnogoetazhnogo monolitnogo zdaniya s plitnym fundamentom na uprugom osnovanii s primeneniem programmnyh kompleksov SAPFIR i LIRA-SAPR : ucheb.-metod. posobie]*. Kazan' : Kazan. gos. arhitekt.-stroit. un-ta, 2018. 99 p. (rus)

4. SP 20.13330.2016. *Loads and actions*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (date of treatment: 19.06.2024).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikishina Irina Aleksandrovna, Senior Lecturer of the Department of Architectural Design and Engineering Constructions
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: nkl.ir@yandex.ru

Bondarchuk Vladimir Vitalievich, PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Architectural Design and Engineering Constructions
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Литвинский Г. Г.

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ КРЕПИ С РАСПОРНО-ПОДАТЛИВОЙ ТРУБОБЕТОННОЙ СТОЙКОЙ5

Зотов В. А.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ С БОЛЬШИМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ21

МЕТАЛЛУРГИЯ

Романчук А. Н., Куберский С. В., Смолярчук Д. А., Вакуленко Е. Л., Гангур Д. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ОТСЕЧКИ КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА ...31

Должиков В. В., Федотов О. В., Скубыря Н. А.

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ И АГЛОМЕРАТА41

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Еронько С. П., Петров П. А., Мечик С. В., Зозуля Ф. С., Прилуцкий М. И.

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ ПРИ ИХ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПОДАЧЕ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ МНЛЗ51

Харламов Ю. А., Денисова Н. А., Петров П. А., Орлов А. А.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТАДИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 4: СВАРИВАЕМОСТЬ МЕДНЫХ, НИКЕЛЕВЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ60

Братцев В. Г., Кучма С. Н.

НАПЛАВКА ШТАМПОВ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ПРИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ РЕМОНТЕ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ75

СТРОИТЕЛЬСТВО

Никишина И. А., Бондарчук В. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ С БЕЗРИГЕЛЬНЫМ КАРКАСОМ В ПК «САПФИР»87

CONTENT

SUBSURFACE MANAGEMENT

Litvinsky G. G.
JUSTIFICATION AND DEVELOPMENT OF A NEW SUPPORT CONSTRUCTION WITH
STRUT-SUPPORTING TUBE-CONCRETE RACK5

Zotov V. A.
ANAYTICAL CALCULATION OF PROCESSES IN SYSTEMS WITH LARGE DELAYS21

METALLURGY

Romanchuk A. N., Kuberskiy S. V., Smolyarchuk D. A., Vakulenko E. L., Gangur D. V.
STUDYING THE EFFICIENCY OF CONVERTER SLAG CUT-OFF METHODS31

Dolzhikov V. V., Fedotov O. V., Skuburya N. A.
INVESTIGATING FLUCTUATIONS IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF SINTERING
MIXTURE AND SINTER41

MECHANICAL ENGINEERING

Yeronko S. P., Petrov P. A., Mechik S. V., Zozulya F. S., Prilutskiy M. I.
INCREASING THE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF MOULD POWDERS
FOR THEIR MECHANIZED FEEDING INTO CCM CRYSTALLIZERS51

Kharlamov Yu. A., Denisova N. A., Petrov P. A., Orlov A. A.
ENSURING MANUFACTURABILITY OF STRUCTURES DURING FRICTION STIR WELDING
AT THE MATERIALS SELECTION STAGE. PART 4: WELDABILITY OF COPPER, NICKEL
AND SUPERALLOYS60

Bratcev V. G., Kuchma S. N.
SURFACING OF HOT STAMPING DIES DURING RESTORATIVE REPAIRS IN ORDER
TO INCREASE DURABILITY75

CIVIL ENGINEERING

Nikishina I. A., Bondarchuk V. V.
MODELLING A MULTI-STOREY GIRDERLESS OSSATURE BUILDING
IN THE SP "SAPPHIRE"87

Distribution and replication is forbidden without official allowance of FSEI HE "DonSTU"

UDC 62 + 669 + 681.51 + 69

EDN: CWDIPG

**Knowledge-intensive technologies
and equipment in industry
and building**

Scientific journal

Issue 4 (78) 2024

**Establisher:
FSEI HE "DonSTU"**

*Registration Certificate for mass media
PI No. FS77-85961 dated 11.09.2023*

*Recommended by academic council
of FSEI HE "DonSTU"
(Record № 12 dated 28.06.2024)*

Added to scientometrical database of RISC

Format 60×84½

Conventional printed sheet 11,9

Order № 156

Circulation 500 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
294204

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., 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.

Korshunov G. I. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Eremenko V. A. — 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.

Vitrenko V. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Kuzin A. V. — Doctor of Tech. Sc., Asst. Prof.

Mikhailov A. N. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Kozlov A. M. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Asst. Prof.

Snitko S. A. — Doctor of Tech. Sc., Asst. Prof.

Korzun E. L. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Bogatyreva E. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Yakovchenko A. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Goncharuk A. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Kuberskiy S. V. — PhD in Engineering, Prof.

Denischenko P. N. — PhD in Engineering, Prof.

Davidenko A. I. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Suleymanova L. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Smolyago G. A. — 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", 2024

© Chernyshova N. V., graphic cover
design, 2024