

ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

Выпуск 25 (68) 2021



СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник
научных трудов
Донбасского государственного технического
института**

Сборник
Выходит 4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 25 (68) 2021

Collection of Scientific Papers of DonSTI

Collection
Publishing 4 times a year
Founded in June 1999
Issue 25 (68) 2021

Алчевск
2021

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

**Сборник научных трудов
Донбасского государственного
технического института**

Сборник

Выпуск 25 (68) 2021

**Основатель:
ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»**

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

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

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

*Рекомендовано учёным советом
ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»
(Протокол № 5 от 24.12.2021)*

Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84½
Усл. печат. л. 13,5
Заказ № 1
Тираж 100 экз.

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

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

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

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕНТР,
ауд. 2113, т./факс 2-58-59

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя и распространителя
средства массовой информации
МИ-СГР ИД 000055 от 05.02.2016

Главный редактор

Вишневский Д. А. — к.т.н., доц., ректор

Заместитель главного редактора

Куберский С. В. — к.т.н., проф.,
проректор по научной работе

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.

Борщевский С. В. — д.т.н., проф.

Корнеев С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. А. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Зинченко А. М. — к.э.н., доц.

Снитко С. А. — д.т.н., проф.

Должиков В. В. — к.т.н., доц.

Денищенко П. Н. — к.т.н., доц.

Шолух Н. В. — д. арх., проф.

Андрійчук Н. Д. — д.т.н., проф.

Пиладов М. В. — д.т.н., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной
коллегии

Для научных сотрудников, аспирантов,
студентов высших учебных заведений.

Язык издания:
русский, английский

Компьютерная вёрстка
Исмаилова Л. М.

© ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021
© Чернышова Н. В., художественное
оформление обложки, 2021

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

GEOSCIENCES

УДК 622.837

к.т.н. Ларченко В. Г.,
Шпакова А. О.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, larchenko2020@rambler.ru)

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ОСЕДАНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД
ОТ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

Работа посвящена определению зависимости скорости оседаний земной поверхности от влияющих факторов. Установлены линейная зависимость скорости оседаний горных пород от скорости подвигания очистного забоя, максимального оседания и степенная зависимость от глубины подработки.

Ключевые слова: скорость оседаний, подвигание очистного забоя, максимальное оседание, глубина подработки, зависимость.

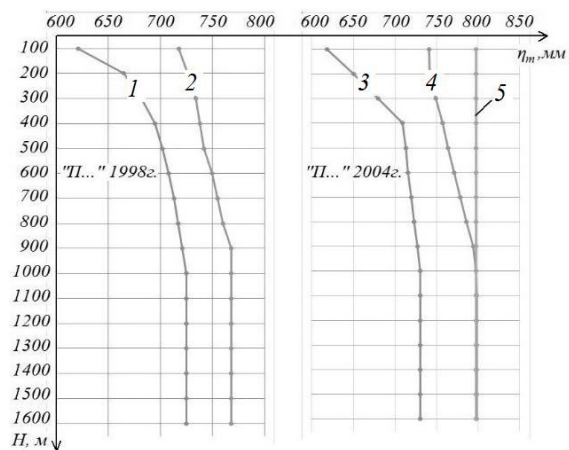
Для решения вопросов выбора мер охраны железных дорог МПС, коммуникаций линейного типа необходимо знать не только максимальные значения сдвижений и деформаций, но и суточную скорость оседаний и горизонтальных сдвижений земной поверхности, определить которые можно систематическими инструментальными наблюдениями по профильным линиям грунтовых реперов, заложенным вдоль и в перпендикулярном направлении к охраняемому объекту.

В существующих условиях ЛНР систематические натурные наблюдения не везде возможны и являются трудоемкими. Маркшейдерская служба шахт или проектные организации в этих случаях пользуются действующими отраслевыми нормативными «Правилами...» [1, 2], в которых методика расчета ожидаемых сдвижений и деформаций приведена только до глубины разработки 1000 м, но и она устарела, так как вычисленные по методикам [1, 2] максимальные оседания земной поверхности η_m (а от них зависят горизонтальные сдвижения и все виды деформаций) и приведенная зависимость η_m от глубины подработки H (рис. 1), противоречат теории сдвижения горных пород, что подтверждено исследованиями [3, 4].

Поэтому актуальным вопросом является установление зависимости скорости оседания земной поверхности от основных

влияющих факторов, так как очистные работы на ряде шахт ЛНР производятся на глубине 1200 м и более.

В связи с этим целью настоящей работы является определение зависимости максимальной скорости оседаний земной поверхности от глубины подработки H , максимального оседания горных пород η_m и изменений скорости подвигания очистного забоя C .



1, 3 — ломаные в районах залегания антрацита;
2, 4 — ломаные в районах залегания других марок угля при отношениях мощности четвертичных отложений h к глубине подработки H менее или равных 0,3; 5 — прямая в районах залегания других марок при отношениях ширины целика l к H , равных 0,4

Рисунок 1 Графики зависимости максимальных оседаний земной поверхности η_m от глубины очистных работ H , вычисленные по методикам [1, 2]

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Объект исследования — процесс сдвижения подработанной толщи горных пород при добыче угля подземным способом.

Предмет исследования — зависимость скорости оседаний горных пород от основных влияющих факторов.

Задачи исследования:

– установить основные факторы, влияющие на максимальную скорость оседаний подработанного массива горных пород;

– определить влияние скорости подвигания очистного забоя на скорость оседаний земной поверхности;

– установить степень влияния глубины очистных работ на максимальную скорость оседания земной поверхности.

Исследования выполнялись методом комплексных частотных инструментальных наблюдений, включающим:

1) систематические наблюдения на 15 профильных линиях грунтовых реперов земной поверхности (табл. 1) [5–7] и их математическую обработку;

2) наблюдения за глубинными реперами, заложенными в пробуренные с земной поверхности вертикальные скважины (табл. 1) [7];

3) инструментальные наблюдения по реперам профильных линий в горных выработках шахты «Степная» ПО «Павлоградуголь»;

4) теоретические исследования методом конечных элементов [8];

5) сбор результатов натурных наблюдений в Восточном Донбассе и их анализ;

6) определение пространственного положения очистных забоев и вынимаемой мощности пластов на каждую дату натурных наблюдений.

Таблица 1

Параметры, определяющие максимальные скорости оседаний горных пород

№ станции	№ репера	C_z , м/сут.	V_0 , мм/сут.	H , м	η_m , мм	k , 1/м ^{1/2}	k' , 1/м
1	2	3	4	5	6	7	8
Толщи карбона							
12	1	1,81	58,8	27	952	0,177	0,92
12	2	1,81	53,1	37	947	0,188	1,15
12	3	1,81	51,4	42	943	0,195	1,26
12	4	1,81	47,0	47	934	0,191	1,27
12	47п	1,81	29,2	104	830	0,198	2,02
13	1	2,1	51,7	26,4	853	0,148	0,76
13	2	2,1	51,2	32	851	0,162	0,92
13	3	2,1	50,2	37	848	0,171	1,04
13	4	2,1	49,2	43	842	0,182	1,20
13	5	2,1	44,8	48	833	0,177	1,23
13	6	2,1	44,3	53	831	0,185	1,34
13	35п	2,1	28,1	109	850	0,164	1,72
Среднее			0,178			1,24	
Земной поверхности							
7	46	2,08	11,8	194	590	0,133	1,86
8	41	1,56	11,5	183	646	0,154	2,09
9	42	1,24	8,2	242	680	0,151	2,35
10	28	1,8	22,5	154	920	0,169	2,09
11	34	1,89	12,9	140	550	0,147	1,74
11	86	2,33	14,9	159	495	0,163	2,05

Продолжение таблицы 1

№ станции	№ репера	C_3 , м/сут.	V_0 , мм/сут.	H , м	η_m , мм	k , $1/м^{1/2}$	k' , $1/м$
1	2	3	4	5	6	7	8
Земной поверхности							
12	29	1,45	20,1	116	840	0,178	1,91
12	42	1,37	20,2	107	860	0,177	1,83
13	31	3,15	41,0	114	860	0,162	1,72
13	40	3,27	40,6	107	900	0,143	1,48
13	50	1,68	26,0	102	910	0,172	1,73
3	380	1,0	11,1	103	800	0,141	1,43
Среднее						0,157	1,86
Общее среднее						0,168	1,55

Исследованиями [3–8] установлено, что максимальная скорость оседаний земной поверхности V_0 в главных сечениях мульды сдвижения зависит от следующих факторов: вынимаемой мощности пластов m (максимального оседания η_o), глубины разработки H , скорости подвигания очистных забоев C_3 , размеров выработанного пространства по падению и простиранию пласта D_1 , D_2 , физико-механических свойств горных пород, угла падения пластов α , нарушенности массива горных пород первичной подработкой, наличия тектонических нарушений, способа управления кровлей. Ежедневные натурные инструментальные наблюдения в активной стадии процесса сдвижения позволяют получить суммарное значение максимальной скорости оседаний земной поверхности от всех перечисленных влияющих факторов.

Для дифференцированной оценки зависимости максимальной скорости оседаний земной поверхности η_o от влияющих факторов сократим их количество, приняв постоянными наиболее часто встречающиеся горно-геологические (типовые) условия: полная подработка, когда отношение размеров выработанного пространства D_1 , D_2 к глубине подработки H более 1; управление кровлей — полное обрушение; отсутствие на исследуемом участке тектонических нарушений; постоянный угол падения пластов.

Натурными наблюдениями установлено [6], что максимальная скорость оседаний земной поверхности V_0 проявляется на коротком интервале времени (рис. 2, 3). Поэтому по результатам ежедневных наблюдений на комплексных станциях рекомендуем периодические наблюдения для определения максимальных скоростей оседаний земной поверхности производить с интервалом времени t_n в соответствии с эмпирической формулой (1) [7]:

$$t_n = \frac{l_{обр}}{C_3}, \text{ сут}, \quad (1)$$

где $l_{обр}$ — шаг обрушения основной кровли, м;

C_3 — скорость подвигания очистного забоя, м/сут.

Результаты инструментальных частотных наблюдений в горно-геологических условиях шахт Западного Донбасса при глубинах подработки до 250 м приведены в таблице 1. Построенные по ним графики зависимости (рис. 2, 3) показывают, что даже незначительные по величине и кратковременные изменения скорости подвигания очистного забоя в горно-геологических условиях шахт Западного Донбасса вызывают соответствующие пропорциональные изменения максимальных скоростей оседаний (рис. 2), так и скоро-

сти оседания каждой точки (репера) земной поверхности (рис. 3, а) и толщи горных пород (рис. 3, б) в главном сечении мульды на участках плоского дна в процессе сдвижения (рис. 3).

По фактическим результатам максимальной скорости оседаний V_0 , скорости подвигания очистного забоя C_3 , глубины подработки H , максимального оседания η_m (табл. 1) построен график зависимости V_0 от H (рис. 4), свидетельствующий, что при глубинах подработки H от 25 до 250 м зависимость максимальной скорости оседаний подработанного массива пород от глубины разработки является гиперболической (рис. 4), а ранее V_0 определяли из уравнения (2):

$$V_0 = k' \cdot \frac{m \cdot C_3}{H}, \text{ мм/сут}, \quad (2)$$

где k' — коэффициент, зависящий от литологии подработанного массива и прочности горных пород.

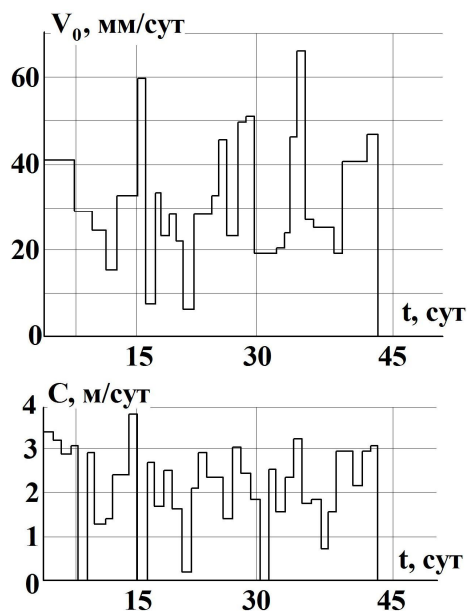
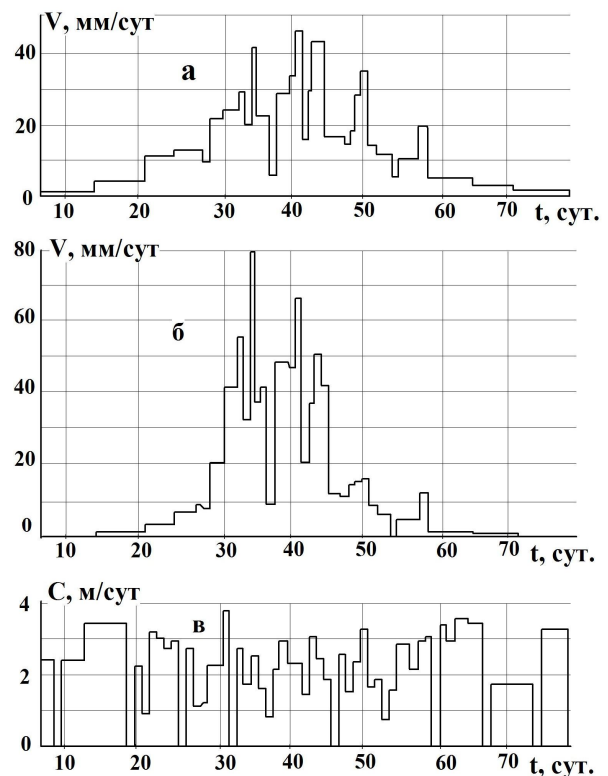


Рисунок 2 Гистограммы зависимости максимальных скоростей оседаний земной поверхности по станции № 13 от изменений скорости подвигания очистного забоя (лава № 604) шахты «Степная» ПО «Павлоградуголь»



а — скорости оседаний земной поверхности; б — скорости оседаний нижнего глубинного репера; в — скорости подвигания очистного забоя

Рисунок 3 Гистограммы зависимости максимальных скоростей оседаний земной поверхности по наблюдательной станции № 13 шахты «Степная» от изменений скорости подвигания очистного забоя

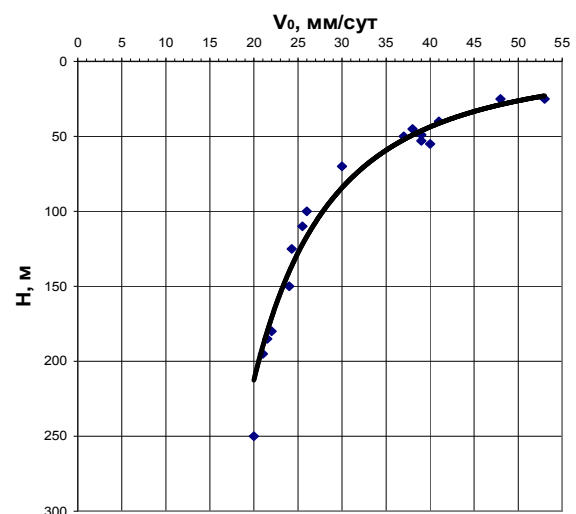


Рисунок 4. График зависимости максимальной скорости оседаний горных пород от глубины разработки (табл. 1) [6, 7]

В применяемой ранее формуле (2) расчета максимальной скорости оседаний земной поверхности V_0 при подработке на глубинах H до 250 м использована вынимаемая мощность пласта m , не зависящая от глубины подработки H . Но с увеличением глубины очистных работ в формуле (2) с целью повышения точности определения V_0 целесообразно использовать вместо m максимальные оседания земной поверхности η_m (табл. 1) [3, 4], позволяющие учитывать вынимаемую мощность пласта, степень подработки (отношение D/H), метаморфизм массива пород (марку угля) и степенную зависимость V_0 от глубины горных работ H в соответствии с результатами натурных наблюдений (табл. 1, рис. 4). То есть расчет максимальных скоростей оседаний V_0 рекомендуем выполнять по формуле (3):

$$V_0 = k \cdot \frac{\eta_m \cdot C_3}{\sqrt{H}}, \text{ мм/сут.} \quad (3)$$

Прочность толщи пород и глубина горных работ в восточных районах Донбасса не менее чем в два раза больше, чем в Западном Донбассе, поэтому и коэффициент k в формуле (3) будет минимум в два раза меньше в сравнении с аналогичными условиями шахт Западного Донбасса.

Средняя квадратическая погрешность коэффициента k , вычисленного из формулы (3), составила $m_k = \pm 0,018$, а вычисленная из формулы (2) — $m_k = \pm 0,438$.

Относительные средние квадратические погрешности составили при степенной зависимости V_0 от H $M_{отн\Delta k} = 10,7\%$, а при линейной зависимости — $M_{отн\Delta k'} = 28\%$, что подтверждает степенную зависимость максимальной скорости оседаний горных

пород V_0 от глубины очистных работ H (рис. 4, табл. 1).

По ограниченному количеству натуральных наблюдений в Восточном Донбассе было установлено, что $k = 0,08 \text{ 1/м}^{1/2}$. Достоверно определить коэффициент k в горно-геологических условиях шахт ГУП ЛНР «РТК „Восток уголь“» можно только систематическими инструментальными наблюдениями или установить автоматизированную наблюдательную станцию [9].

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлена зависимость максимальной скорости оседаний земной поверхности от максимального оседания, глубины подработки и изменений скорости подвигания очистного забоя, что позволит повысить эффективность выбора мер охраны железных дорог и коммуникаций линейного типа.

2. Предложен оптимальный интервал между инструментальными наблюдениями t_n (формула (1)) для повышения точности определения максимальной скорости оседаний горных пород.

3. Рекомендована формула (3) для прогноза максимальной скорости оседаний горных пород, что повысит качество выбора принятых мер охраны подрабатываемых железных дорог.

4. Достоверно определить значения постоянного коэффициента k можно только натурными инструментальными наблюдениями или автоматизированной станцией [9].

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методики прогноза общей продолжительности и стадий процесса сдвижения горных пород при добыче угля подземным способом, проведение натурных инструментальных наблюдений.

Библиографический список

1. ГСТУ 101.00159226.001–2003. *Отраслевой стандарт Украины. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом [Текст].* — Введ. 2004–01–01. — К. : УкрНИМИ НАН Украины, 2004. — 128 с.

2. ПБ 07–269–98. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях [Текст] : утв. Госгортехнадзором Рос. Федерации 16.03.1998. — Введ. 1998–10–01. — СПб. : Межотраслевой науч. центр ВНИИ, 1998. — 291 с.

3. Ларченко, В. Г. Зависимость сдвижений и деформаций земной поверхности от глубины подработки [Текст] / В. Г. Ларченко, Е. В. Коваленко, Ю. А. Маталкина // Труды РАНИМИ : сб. науч. тр. — Донецк, 2019. — № 8 (23). — С. 125–134.

4. Ларченко, В. Г. Совершенствование методики расчета ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности при добыче угля [Текст] / В. Г. Ларченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2019. — Вып. 15 (58). — С. 20–26.

5. Ларченко, В. Г. Результаты исследований параметров процесса сдвижений и деформаций горных пород при отработке свиты пологих пластов [Текст] / В. Г. Ларченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2008. — Вып. 27. — С. 88–98.

6. Ларченко, В. Г. Практические результаты исследований деформаций земной поверхности при отработке свиты пологих угольных пластов [Текст] / В. Г. Ларченко // Форум гірників — 2009 : матеріали Міжнародної конф. — Днепропетровск : НГУ, 2009. — С. 222–230.

7. Ларченко, В. Г. Процесс сдвижений и деформаций подработанного массива горных [Текст] / В. Г. Ларченко // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях : материалы 7-го международного симпозиума. — Белгород : ВИОГЕМ, 2003. — С. 238–244.

8. Ларченко, В. Г. Определения зависимостей параметров сдвижений и деформаций подработанной толщи пород от определяющих факторов методом конечных элементов [Текст] / В. Г. Ларченко, О. А. Черных // Вестник МАНЭБ. — СПб., 2006. — № 22. — С. 16–24.

9. Ларченко, В. Г. Автоматизированная наблюдательная станция для мониторинга сдвижений и деформаций горных пород [Текст] / В. Г. Ларченко, О. М. Куценко, Ю. А. Маталкина // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2007. — Вып. 1 (24). — С. 81–87.

© Ларченко В. Г.

© Шпакова А. О.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТИ Леоновым А. А.,
нач. отд. геологии и недропользования Минтопэнерго ЛНР Тихомировой Е. В.**

Статья поступила в редакцию 06.12.2021.

**PhD in Engineering Larchenko V. G., Shpakova A. O. (DonSTI, Alchevsk, LPR,
larchenko2020@rambler.ru)**

DEPENDENCE OF THE ROCK SUBSIDENCE RATE ON THE INFLUENCING FACTORS

The work is devoted to determining the dependence of rate of the Earth's surface subsidence on influencing factors. There have been determined the linear dependence of the rock subsidence rate on the rate of working face advancing, the maximum subsidence and a power dependence on the depth of undermining.

Key words: *subsidence rate, working face advancing, maximum subsidence, depth of undermining, dependence.*

УДК 622.11

к.т.н. Шульгин П. Н.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, dekan.gf@dstu.education)

300-ЛЕТИЕ ОСВОЕНИЯ ДОНЕЦКОГО КАМЕННОУГОЛЬНОГО БАСЕЙНА (ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ГОРНОГО ДЕЛА В ДОНБАССЕ)

*Сей минерал, если не нам, то нашим
потомкам зело полезен будет.*

Петр I Великий

Рассмотрены исторические аспекты открытия месторождения каменного угля в Донбассе, показано влияние этого открытия на развитие региона, раскрыты основные исторические этапы и личности, которые стояли у истоков зарождения угледобычи в Донбассе.

Ключевые слова: каменный уголь, Донбасс, история, открытие, солепромысел, энергетика, месторождение, пласт.

Донецкий угольный бассейн является крупнейшим месторождением каменного угля в Европе. Когда-то на этом месте простиралось море. Прошли тысячелетия и остатки растительности и животного мира превратились в каменный уголь. Благодаря этим месторождениям получил развитие целый регион — Донбасс (рис. 1).

Именно уголь стал первым ископаемым топливом, которое стал использовать человек. Благодаря углю произошла первая промышленная революция, которая привела к стремительному развитию промышленности, переходу от ручного труда к машинному и возникновению индустриального общества.

С XVI века начинается промышленное освоение Донбасса. Во второй половине XIX века Донбасс становится одним из ведущих промышленных регионов Российской империи, а к началу XX века Донецкий край играет крайне важную роль на всероссийском рынке угля и металла.

История «открытия» каменного угля в Донбассе весьма интересна. Слово «открытие» взято в кавычки не случайно — уголь и железную руду никто специально не открывал. В Донбассе уголь впервые был «открыт» обычными жителями, которые первыми стали топить свои печи «горюч камнем», благо, что было этого «камня» предостаточно:

обильные россыпи его встречались (да и встречаются) во многих балках Луганщины.

Горюч камень — ископаемый уголь — первый из используемых человеком видов минерального топлива. Его собирательство с поверхности у побережий морей и рек, где размывались выходы угольных пластов, началось еще в палеолите и продолжалось вплоть до XVI в. Разрабатывались мелкие месторождения, залегающие неглубоко от поверхности земли. Собранный или добытый примитивным ручным способом в мелких горных выработках уголь использовался для отопления жилищ и кузнечных работ.

Развитие и усовершенствование горного дела было напрямую связано с началом индустриальной революции [1]. Потребность в дешевом ископаемом топливе резко возросла после изобретения Джеймсом Уаттом паровой машины. Увеличение числа машин в разных отраслях промышленности вызвало повышенную потребность в металле. А бурный рост металлургии, в свою очередь, привел к массовому истреблению лесов в середине XVIII века. Экономическая необходимость заставила перейти к использованию каменного угля для получения энергии.

Дикое Поле, на территории которого в XVII–XIX веках возник современный Донбасс, было периферией Руси в период

феодалной раздробленности и монголо-татарского нашествия.

Территория Донбасса с раннего Средневековья входила в ареал Древнерусского государства — Руси, находилась на окраине Русской земли, часто была объектом экспансии других племен и народов.

Степи Дикого Поля были пригодны для развития земледелия, скотоводства и промыслов, что способствовало началу их освоения ещё во времена Киевской Руси. Этому, однако, препятствовали набеги степных кочевников, которые волнами прокатывались по этим землям с древнейших времён.

Для защиты от них из Киева, Чернигова и других городов направлялись княжеские дружины и создавались сторожевые посты, а в дальнейшем из них вырастали поселения и города.

Одним из таких укреплений на Донбассе стала крепость Бахмут. В 1701 году Пётр I приказал построить на Бахмуте крепость и переименовать в острог Бахмут (рис. 2). Позже государство стало брать налог за добычу соли из озёр, а Бахмутские солеварни было приказано отобрать в казну. Охрану

бахмутских соляных разработок, как и добычу соли для казны, государство поручило бахмутским, торским и маяцким казакам, которые организационно были объединены в Бахмутскую казачью кампанию.

Бахмутский солепромысел, стихийно возникший в 1701 году, развивался в весьма сложных условиях. На его деятельности не могли не отразиться такие факторы, как постоянная опасность нападения крымских татар и ногайцев, борьба за обладание солепромыслом между донскими казаками и Изюмским полком, отсутствие рабочей силы и топлива.

В результате менялось состояние солепромысла. Первые годы он был частным. В 1705 г. солеварни были разорены и ограблены во время знаменитого Булавинского восстания [2]. Следующий этап — переход производства в государственную собственность (в подчинение Каморколлегии). Однако должного эффекта не последовало. И казна решила отдать его на откуп частным лицам. Такими лицами стали капитан Семен Чирков и лантрат Никита Вепрейский.

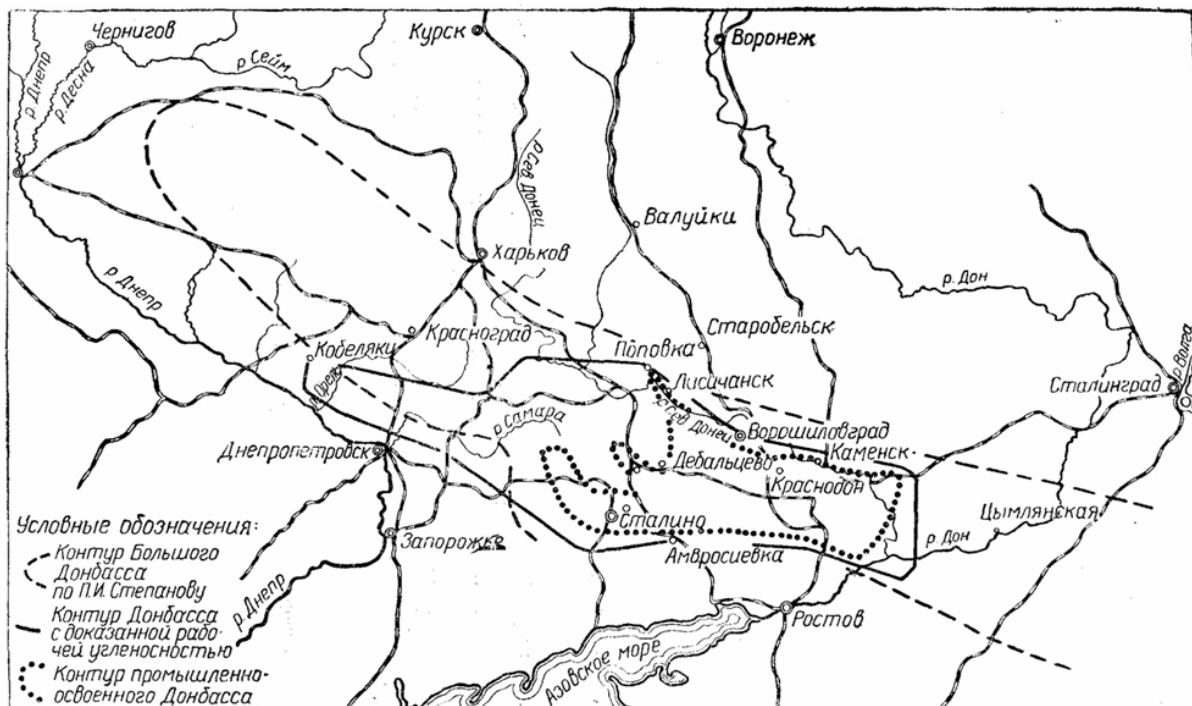


Рисунок 1 Схематическая карта Донбасса



Рисунок 2 Крепость Бахмут

Для полноценного функционирования солепромысла необходимо было решить, по крайней мере, две важные проблемы: обеспечить предприятие рабочей силой и найти новые источники топлива. Решение первой проблемы взяла на себя казна, а вот поиском альтернативных источников топлива занялись новые арендаторы.

Топливная проблема в России остро встала уже в начале XVIII столетия. Ведь чугун и другие металлы плавил тогда исключительно на древесном угле. На нужды металлургической промышленности изводились целые лесные массивы.

Правительство Петра I вынуждено было строжайше запретить рубку лесов. В условиях степного безлесья в Донецком крае эта проблема стояла еще более остро. Для выварки соли бахмутским солеварам постоянно требовалось огромное количество дров.

Немало леса шло на выжигание древесного угля, применявшегося в казенных кузницах. За короткое время по речкам и

балкам в радиусе 30–40 верст от Бахмута было вырублено почти все, что можно было рубить. Дрова для солепромысла, как и древесный уголь, стали привозить из более отдаленных мест, что приводило к удорожанию соли.

Как раз в это время был подписан знаменитый указ Петра I [3] об охране лесов по берегам рек, которым предписывалось сберечь от рубки деревья ценных пород. Согласно этому указу, предписывалось брать штраф в десять рублей (огромные для того времени деньги). За порубку крупного дуба, даже одного, или за массовую порубку других ценных деревьев предписывалась смертная казнь.

Как писал о тогдашней бахмутской топливной проблеме Гюльденштедт [4]: *«Здесь сжигают каждые 24 часа 4 кубических сажень дров (почти 39 кубометров). Они привозятся частично с Донца, из местности в устье Бахмута, частично из района истоков рек Булавин Колодец и*

Миус. До обоих мест 60 и 70 верст (около 60 и 70 км)».

Никита Вепрейский и Семен Чирков не раз задумывались над тем, как решить топливную проблему. Выход виделся в применении каменного угля.

Как раз в это время (10 декабря 1719 года) в свет выходит петровская Берг-привилегия — указ Петра I, регламентирующий поиски руд и минералов в России. Согласно этому документу [5], «...соизволяется всем и каждому дается воля, какого б чина и достоинства ни был, во всех местах как на собственных, так и на чужих землях искать, плавить, варить и чистить всякие металлы, сиречь: золото, серебро, медь, олово, свинец, железо, також и минералов, яко селитра, сера, купорос, квасцы и всяких красок потребные земли и камни...».

Возможно, что именно Берг-привилегия и подтолкнула Никиту Вепрейского и Се-

мена Чиркова к поискам угля, что было так необходимо солепромыслу. И поиски их были не напрасны — в 1721 году ими было открыто месторождение каменного угля в балке Склеватая в 25 верстах от Бахмута (рис. 3).

Случилось это в верховьях речки Лугани. В то далекое время здесь не было поселений. По нынешним ориентирам, согласно одной из версий, первый уголь в Донбассе был найден близ поселка Луганское и Мироновской ГРЭС, на территории Артемовского района Донецкой области. Согласно другой — в том районе, где ныне находится поселок Городище Перевальского района [5–7].

Будучи людьми целеустремленными и деятельными, Вепрейский и Чирков развернули широкомасштабную поисковую работу по всей Бахмутской провинции и за ее пределами. Искали руды и уголь, новые соляные источники (рис. 4).



Рисунок 3 Схема маршрутов поиска каменного угля и руд

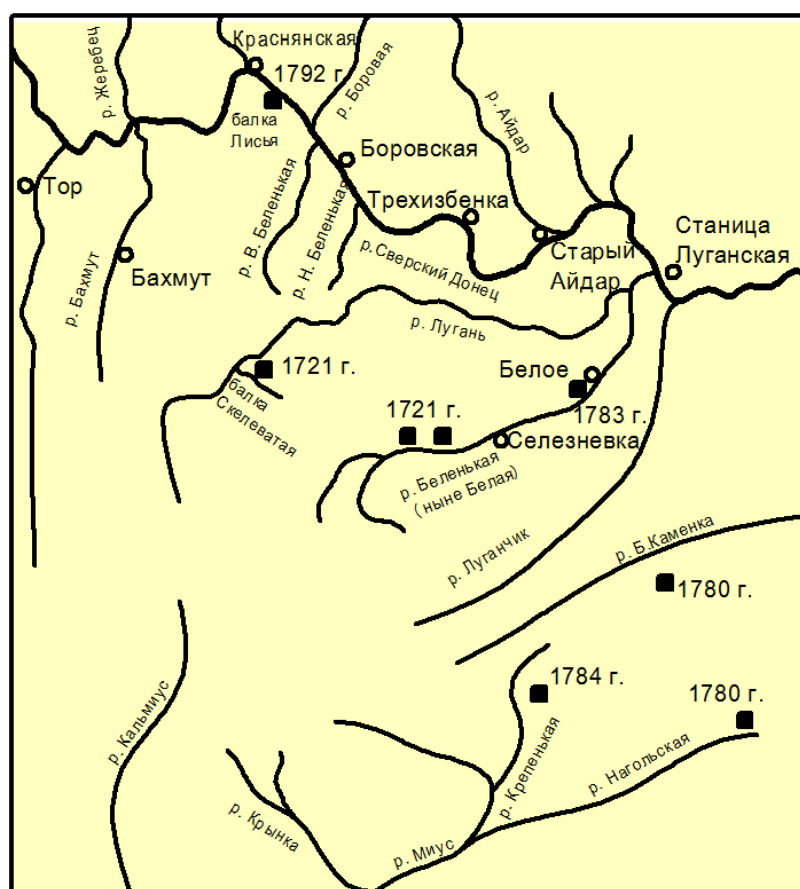


Рисунок 4 Время и место открытия основных каменноугольных месторождений в Донбассе в XVIII веке

О результатах этих поисков и своих проблемах они доносили Петру I и в Камер-коллегию.

Вместе с донесениями они присылали взятые ими в разных местах образцы руды и каменного угля. Каменный уголь, взятый ими на речке Беленькой, в Москве испытал английский мастер Никсон: *«Показывали мне уголье в коллегии, которое я опробовал. И оно является изрядное. И если такого много угля в той земле, то довольно удовольствие подает и на всякие потребности угодны...»*.

В пору активных поисков каменного угля Вепрейский и Чирков были уже людьми зрелыми, опытными и успели оставить добрый след на земле. Капитан С. Чирков командовал батальоном в составе Изюмского слободского полка, принимал активное участие в борьбе с крымски-

ми татарами и турками, отличился в Полтавской битве. Имя Никиты Вепрейского не раз упоминалось среди тех, кто заботился об укреплении Бахмута и его окрестностей. Для них поиск угля был обыденной работой, для нас же, их потомков, это настоящий подвиг. И дата этого подвига зафиксирована точно — 1721 год.

Со времени же совершения подвига (а открытие каменного угля есть великий подвиг) оба они, сами того не подозревая, шагнули в вечность. Их имена навсегда вошли в историю Донбасса.

Ныне, конечно, сложно сказать, кто и когда стал главным первооткрывателем угольных месторождений на Донбассе. Одни называют чиновника солепромыслов города Бахмута (ныне Артемовск) Никиту Вепрейского и капитана Семена Чиркова, отыскавших «горюч камень» как энерго-

носитель для нужд местной солеварни еще в 1721 году. Другие говорят о 32-летнем лозоходце подьячем приказной избы из села Даниловского под Кинешмой Григории Капустине. С 1715 года он промышлял руду в устюжском, костромском и воронежском краях, открыв месторождения золота, серебра и иных руд, чем снискал себе расположение чиновников Берг-коллегии. Но одно сказать можно точно: именно открытие месторождения каменного угля положило начало промышленного освоения Донбасса.

Подводя итог, хотелось бы отметить, что, несмотря на 300-летнюю историю развития, угольная промышленность Донбасса в настоящий момент находится в неудовлетворительном состоянии. Наблюдается падение добычи угля при одновременном прогнозировании развития этих тенденций в будущем. Для угольных предприятий характерен низкий технический уровень добычи угля, значительная

изношенность основных фондов, недостаток финансовых ресурсов для их обновления, неудовлетворительное материально-техническое обеспечение. Практически все угольные предприятия более 20 лет работают без реконструкции.

При решении первоочередных задач угольной промышленности в условиях Донбасса важно учитывать, что большинство запасов угля сосредоточено в сложных горно-геологических условиях, в пластах малой мощности. В связи с этим необходимо создание нового уровня техники для проходческих и очистных работ на маломощных пластах.

Дальнейшего развития и роста угольного производства можно достичь только путем технического переоснащения предприятий, их реконструкции, нового строительства с использованием наукоемких средств и технологий на базе достижений машиностроения, электроники, автоматизации, информатики и т. п.

Библиографический список

1. Миронов, В. К. Справочник геолога-угольщика [Текст] / В. К. Миронов. — М. : Недра, 1991. — 363 с.
2. Проништейн, А. П. Земля Донская в XVIII веке [Текст] / А. П. Проништейн. — Ростов н/Д : Изд-во Ростовского университета, 1961. — 376 с.
3. Рохленко, Д. Петр Великий. Флот и ле. [Текст] / Д. Рохленко // Наука и жизнь. — 2003. — № 5. — С. 40–47.
4. Подов, В. И. История Донбасса. В 3 т. Т. 1. Донбасс в XVII–XVIII веках [Текст] / В. И. Подов. — Луганск : Альма-матер, 2004. — 336 с.
5. Агапов, В. Л. Угольный Донбасс в контексте политики модернизации России (XVIII век) [Текст] / В. Л. Агапов // Журнал исторических, политологических и международных исследований. — 2019. — № 1 (68). — С. 48–62.
6. Каныгин, Ю. Открытие Городища [Текст] / Ю. Каныгин, Ю. Батюшин. — К. : Украина, 2007. — 19 с.
7. Подов, В. И. Открытие Донбасса. Исторический очерк. Документы [Текст] / В. И. Подов. — Луганск, 1991. — 118 с.

© Шульгин П. Н.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТИ Литвинским Г. Г., гл. инженером ПП «Шахтоуправление „Ясеновское“» ГУП ЛНР «РТК „Востокуголь“» Степченковым А. В.

Статья поступила в редакцию 30.11.2021.

PhD in Engineering Shulgin P. N. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, dekan.gf@dstu.education*)

300th ANNIVERSARY DEVELOPING OF THE DONETSK COAL MINING BASIN (HISTORY OF THE EMERGENCE AND DEVELOPMENT OF MINING IN DONBASS)

The historical aspects of the discovery of a coal deposit in the Donbass are considered, the influence of this discovery on the regional development is shown, the main historical stages and personalities that stood at the origins of coal mining formation in the Donbass are revealed.

Key words: coal, Donbass, history, discovery, salt industry, energetics, deposit, seam.

**МЕТАЛЛУРГИЯ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCES**

УДК 679.7.025.7

д.т.н. Рябичева Л. А.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, ryabic@gmail.com),
к.т.н. Коробко Т. Б.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, korobko.tamara@rambler.ru),
Дядичев А. В.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ ПРИ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОРОШКОВОЙ ПОРИСТОЙ ЗАГОТОВКИ

Исследовано влияние противодействия на распределение деформаций и плотности при прямом выдавливании пористой заготовки. Показано, что увеличение величины деформаций и уменьшение неравномерности по объему детали наблюдаются при росте противодействия при выдавливании. Равномерность плотности увеличивается с ростом противодействия. При росте противодействия наблюдается более равномерная твердость по сечению детали, что обеспечивает повышение качества детали. Результаты исследований внедрены при разработке технологии изготовления полых деталей прямым выдавливанием пористой заготовки.

Ключевые слова: противодействие, накопленная деформация, относительная плотность, прямое выдавливание, пористая заглушка, технология.

Развитие машиностроения неразрывно связано с применением прогрессивных методов производства деталей различными видами обработки металлов давлением. Расширяется использование процессов, основанных на холодной пластической деформации заготовок, в том числе полученных методами порошковой металлургии. Такие процессы обеспечивают изготовление деталей с точными размерами и высоким качеством поверхности и, следовательно, позволяют сократить, а чаще — полностью исключить операции обработки резанием. Холодная пластическая деформация в сочетании с термической обработкой обеспечивает стабильное получение заданных физико-механических свойств и структуры металла, необходимых для повышения надежности и долговечности как деталей, так и узлов машины в целом.

Холодная объемная штамповка порошковых пористых заготовок является одним из перспективных методов изготовления таких деталей, как гильзы, колпачки, стаканы, которые широко применяются в различных узлах машин, имеют внутренние глухие или

сквозные полости, переходы по высоте по наружному и внутреннему диаметрам. Получение таких деталей механической обработкой заготовок из проката связано с высокой трудоемкостью, большими отходами металла в стружку, использованием сложного и дорогостоящего инструмента. Штамповка из компактных материалов сопряжена с низкой стойкостью пресс-оснастки и большим числом переходов в процессе формоизменения [1]. Наиболее перспективным технологическим процессом получения такого рода деталей является выдавливание из порошковых пористых заготовок [2].

В связи с этим целью настоящей работы является разработка технологии прямого выдавливания порошковой пористой заготовки с использованием противодействия на основе механики процесса пластической деформации.

Объект исследования — технологический процесс изготовления порошковых полых деталей.

Предмет исследования — влияние противодействия на качество порошковых полых деталей.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Задачи исследования:

- разработка схемы прямого выдавливания;
- исследование изменения координатной сетки после прямого выдавливания;
- определение компонент тензора деформаций при различном противодавлении;
- определение относительной плотности и твердости образца после прямого выдавливания с различным противодавлением;
- оценка качества образцов после прямого выдавливания;
- выбор оптимального противодавления, обеспечивающего качество детали.

При обработке давлением порошковых заготовок одновременно или последовательно протекают два процесса — уплотнение и деформация уплотненного материала с истечением его в свободные полости штампа [3]. Чем большая плотность заготовки достигается на стадии уплотнения и чем позже начнется стадия формообразования, тем больше плотность и меньше неравномерность ее распределения по объему изделия.

При прямом выдавливании силы трения заготовки о стенки матрицы на стадии уплотнения препятствуют вытеканию материала в стенку изделия и началу второй стадии деформирования. В результате достигается высокая плотность изделия. Процесс можно рассматривать состоящим из двух стадий: осадка до пористости 6 % и дальнейшее выдавливание [4].

Для выполнения исследований образцы изготавливали из медного порошка марки ПМС-1 (табл. 1).

Технология изготовления представлена ниже:

- прессование на гидравлическом прессе модели ПД 476 силой 1600 кН цилиндри-

ческих заготовок пористостью 20 % с размером частиц — 100 % менее 0,08 мм; масса порошка — 120 г; диаметр матрицы пресс-формы — 32,0 мм;

- спекание в среде синтез-газа с нагревом по ступенчатому режиму: нагрев до температуры 200, 300, 400 °С и выдержка при каждой температуре по 0,5 ч;

- подъем до 500 °С и выдержка 15 мин, нагрев до 920 °С и выдержка 1 ч;

- прямое выдавливание с противодавлением 50 и 95 МПа образцов для исследования (рис. 1, а) по схеме (рис. 1, б).

В качестве смазки применяли дисульфид молибдена. После выдавливания размеры образцов составили: диаметр $D=32,0$ мм, высота $H=20,1$ мм, глубина полости $h=14,7$ мм, диаметр полости $d=14,7$ мм. При выдавливании пористую заготовку 3 устанавливали в матрицу 1 на упор 6 и подвижный пуансон 5 с противодавлением, создаваемым пружинами. Верхним пуансоном 2 выдавливали образец 4 (рис. 1, б).

Для анализа кинематики течения металла при прямом выдавливании на меридиональном сечении исходных заготовок наносили делительную сетку с шагом $2 \pm 0,002$ мм с помощью координатно-расточного станка. После выдавливания элементы сетки измеряли на инструментальном микроскопе и рассчитывали поле интенсивности деформаций по методике [5].

По искаженной сетке определяли компоненты линейных деформаций:

$$e_z = \ln a_0/a, e_\varphi = \ln b/b_0,$$

где a_0, a — размер делительной сетки после деформации по оси y ; b_0, b — размер делительной сетки после деформации по оси z .

Таблица 1

Химический состав медного порошка

Марка порошка	Массовая доля, %				Прокаленный остаток после обработки порошка азотной кислотой, %, не более
	Cu не менее	Fe	O	Si	
ПМС-1	99,7	Не более			0,05
		0,18	0,10	0,10	

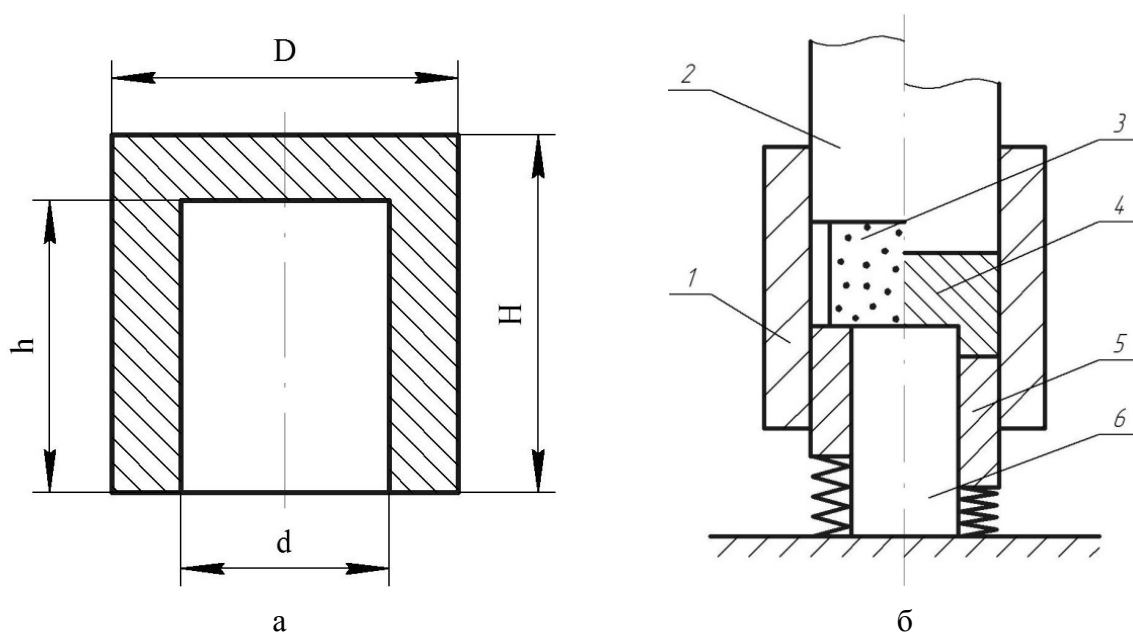


Рисунок 1 Образец для исследований (а) и схема прямого выдавливания (б)

Интенсивность деформации рассчитывали по формуле

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — компоненты тензора деформаций.

После прямого выдавливания определяли плотность методом гидростатического взвешивания. Твердость измеряли на приборе Роквелла (ГОСТ 9013–59) шариком 1,587 мм при нагрузке 1000 Н по шкале HRB.

Процесс прямого выдавливания происходит в две стадии. На первой стадии осуществляются осадка заготовки, радиальное течение металла и заполнение полости матрицы. По мере внедрения пуансона в заготовку материал над торцом уплотняется и после достижения некоторого значения плотности приобретает способность к пластическому течению в условиях неравномерного всестороннего сжатия. Прямое выдавливание заготовки с истечением металла наступает только тогда, когда плотность материала над пуансоном достигает некоторой критической величины, которая определяется свойствами порошкового материала и геометрическими

параметрами изделия. Эксперименты показали, что пористость такой заготовки после деформирования составляет 6 %. Такое разделение процесса прямого выдавливания позволяет исследовать течение металла на второй стадии, когда происходит практически выдавливание компактного материала и течение металла можно охарактеризовать, применяя законы несжимаемого тела.

При визуальном осмотре образцов после прямого выдавливания с различным противодавлением обнаружено, что при противодавлении 50 МПа на торце образуется утяжина, при противодавлении 95 МПа дефекты отсутствуют.

Анализ делительной сетки после деформирования показывает существование двух кинематических модулей очага деформации: в центре образца и на участках закругления пуансона (рис. 2). Неравномерность деформации зависит от величины противодействия. С ростом противодействия наблюдается более равномерное распределение делительной сетки.

Построение изолиний распределения интенсивности деформаций по сечению образца позволяет выполнить анализ кинематики

тики течения металла (рис. 3). При обеих величинах противодействия наблюдаются две зоны торможения: над нижним пуансоном и под верхним пуансоном. В очаге деформации величина интенсивности деформации над пуансоном увеличивается, а на радиусе закругления пуансона незначительно уменьшается. На стенке образца также наблюдается увеличение интенсивности деформации, которое приводит к устранению дефекта в виде утяжины. С ростом противодействия уменьшается неравномерность деформированного состояния. Коэффициент неравномерности де-

формации уменьшается с 6,95 при противодействии 50 МПа до 5,90 при 95 МПа.

Увеличение равномерности деформации обеспечивает устранение дефекта в виде утяжины и увеличение равноплотности образца. Результаты изменения относительной плотности при различном противодействии показали, что при противодействии 50 МПа и глубине полости 14,7 мм относительная плотность образца достигает 0,978, равноплотность составляет 5 %. При противодействии 95 МПа общая относительная плотность образца повышается, а равноплотность составляет 2 %.

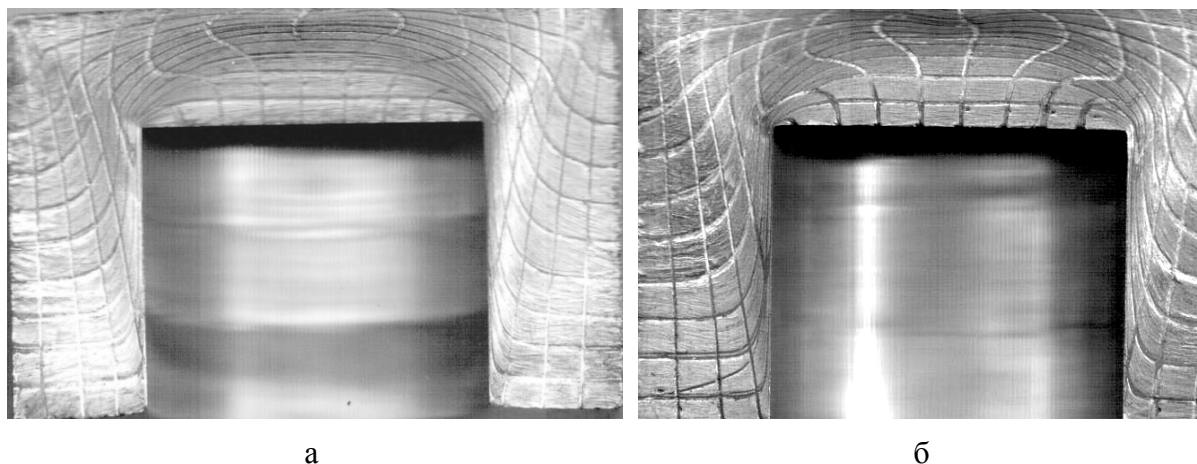


Рисунок 2 Фотографии образцов после выдавливания с противодействием: а — 50 МПа; б — 95 МПа

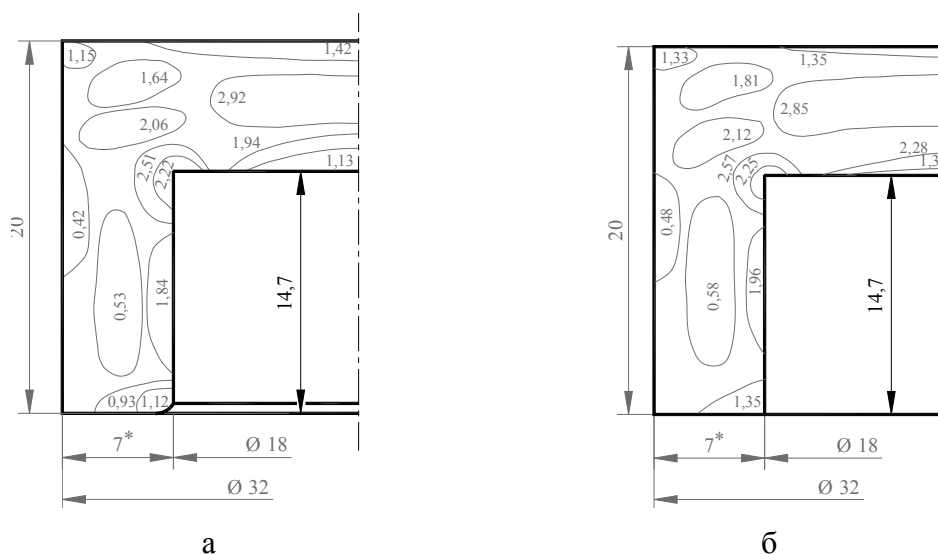


Рисунок 3 Картина изолиний накопленной деформации медных образцов после прямого выдавливания с разным противодействием: а — 50 МПа; б — 95 МПа

Различия в твердости по объему выдавленных образцов не наблюдаются. Средняя твердость при глубине полости 14,7 мм и противодавлении 95 МПа составила 68,3 HRB.

Увеличение противодавления приводит к росту давления прямого выдавливания. При глубине полости 14,7 мм при выдавливании с противодавлением 50 МПа давление составило 580 МПа, с противодавлением 95 МПа его величина равнялась 820 МПа.

Таким образом, с увеличением противодавления наблюдается рост накопленной деформации, при этом неравномерность деформации уменьшается по объему детали. Равноплотность детали и твердость увеличиваются. При большем противодавлении на образцах отсутствуют дефекты в виде утяжин. Выполнение прямого выдавливания порошковых полых деталей с противодавлением 95 МПа обеспечивает высокое качество деталей.

Библиографический список

1. Головин, В. А. *Технология холодной штамповки выдавливанием* [Текст] / В. А. Головин, А. Н. Митькин, А. Г. Резников. — М. : Машиностроение, 1970. — 170 с.
2. *Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование* [Текст] / Г. М. Волкогон, А. М. Дмитриев, Е. П. Добряков. — М. : Машиностроение, 1991. — 320 с.
3. Роман, О. В. *Исследование процесса холодной штамповки выдавливанием спеченных пористых материалов* [Текст] / О. В. Роман, Е. А. Дорошкевич, Е. В. Звонарев // Порошковая металлургия. — 1980. — № 11. — С. 28–34.
4. *Объемная штамповка порошковых материалов* [Текст] / В. М. Горохов, Е. А. Дорошкевич, А. М. Ефимов, Е. В. Звонарев. — Минск : Наука и техника, 1993. — 272 с.
5. Рене, И. П. *Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки* [Текст] / И. П. Рене. — Тула : ТПИ, 1970. — 146 с.

© Рябичева Л. А.

© Коробко Т. Б.

© Дядичев А. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А., к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТИ Денищенко П. Н.

Статья поступила в редакцию 27.10.2021.

Doctor of Technical Sciences Riabicheva L. A. (LSU named after V. Dahl, LPR, ryabic@gmail.com),
PhD in Engineering Korobko T. B. (DonSTI, Alchevsk, LPR, korobko.tamara@rambler.ru),
Diadichev A. V. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR)

EXPERIMENTAL STUDY OF BACK PRESSURE DURING EXTRUSION OF HOLLOW PARTS FROM A POWDERED POROUS BLANK

The effect of back pressure on the distribution of deformations and density during direct extrusion of a porous blank is studied. It is shown that an increase in deformations and a decrease in unevenness in the volume of the part is observed with an increase in back pressure during extrusion. The uniformity of density increases with increasing back pressure. With an increase in back pressure, a more uniform hardness along the section of the part is obtained, which ensures an increase in its quality. The research results were implemented in the development of hollow parts manufacturing technology by direct extrusion of a porous blank.

Key words: back pressure, accumulated deformation, relative density, direct extrusion, porous plug, technology.

УДК 621.791:656.13

д.т.н. Бабанин А. Я.,
Чухаркин А. В.

(ДонНАСА, г. Макеевка, ДНР, a.v.chukharkin@donnasa.ru)

УПРОЧНЯЮЩАЯ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ НАПЛАВКА КЛАПАНОВ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В работе представлены результаты исследований восстановления геометрических размеров и повышения прочностных характеристик фасок клапанов двигателя внутреннего сгорания при их ремонте путем ручной газопламенной наплавки материала на основе стеллита с последующей механической обработкой. Отработаны режимы ручной газопламенной наплавки материала в виде прутка на малые поверхности восстанавливаемых деталей, позволяющие наносить слой металла 1,4–1,7 мм и обеспечивать высокое качество наплавленного слоя по всей толщине с твердостью порядка 68–70 ед. HRA. Установлено, что механическая обработка наплавленного слоя способствует повышению его прочностных характеристик за счет уменьшения балла зерна микроструктуры.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, газораспределительный механизм, клапан, седло, наплавка, механическая обработка, микроструктура, прочность наплавленного слоя.

Эксплуатация автомобильного транспорта — это сложный технологический процесс, одной из основных задач которого является поддержание автомобилей в рабочем состоянии с минимальными затратами на ремонт.

Основным агрегатом автомобиля является двигатель внутреннего сгорания (ДВС), эксплуатация и ремонт которого требуют значительных материальных и финансовых ресурсов [1].

На основании выполненных исследований [2, 3] установлено, что существенное влияние на ресурс ДВС оказывает работа технологического узла «клапан — седло — направляющая втулка». Основными направлениями повышения качества работы данного технологического узла являются:

- придание рабочим кромкам клапанов и седел более высоких механических и служебных свойств, обеспечивающих стойкость к высокотемпературной газовой коррозии и ударной деформации;

- снижение износа сопряженных поверхностей «стержень клапана — направляющая втулка» для исключения перекоса

движения клапана в вертикальном направлении.

К основным сложностям работы клапанов ДВС следует отнести температурные условия эксплуатации и переменные нагрузки при работе на малых оборотах (пассажирский транспорт в городском цикле), зачастую приводящие к прогару, как правило, одного из клапанов газораспределительного механизма (ГРМ). После прогара одного клапана эксплуатация автомобиля значительно осложняется (рис. 1).



Рисунок 1 Характерный вид раковин прогара клапанов газораспределительного механизма

К основным дефектам рабочей кромки клапана следует отнести нарушение ее геометрии и размеров, а также образование раковин, которые значительно снижают герметичность цилиндра (рис. 2). Как видно на рисунке 2, фаска клапана чрезмерно изношена, вследствие чего диаметр тарелки уменьшился с 48 до 46 мм, а цилиндрический пояс ниже фаски отсутствует.

Таким образом, с целью решения задачи — упрочнение рабочей кромки клапана для повышения ресурса ее работы при высокотемпературном режиме и ударных нагрузках, а также для восстановления ее геометрии, включая раковины прогара, с минимальными материальными и финансовыми затратами — были проведены данные исследования. Исследования по восстановлению проводили методом газопламенной наплавки.

Известно, что газопламенную наплавку применяют для восстановления изношенных деталей и для придания поверхностному слою металла особых свойств — коррозионной стойкости, повышенной твердости, стойкости против износа и т. д. При газопламенной наплавке легче регулировать степень нагрева основного и присадочного металлов благодаря их раздельному нагреву. Газокислородное пламя также защищает наплавленный металл от окисления его кислородом воздуха и от испарения элементов, входящих в состав наплаваемого металла.



Рисунок 2 Характерный вид дефектов рабочей кромки клапана ГРМ

Исследования проводили на клапанах двигателя семейства ЯМЗ. Двигатели семейств ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 представляют собой шести- и восьмицилиндровые модели семейства четырехтактных дизелей ПАО «Автодизель» (г. Ярославль) со следующими основными характеристиками: диаметр цилиндров 130 мм; ход поршня 140 мм; рабочий объем всех цилиндров — 11,15 л (ЯМЗ-236) и 14,86 л (ЯМЗ-238); степень сжатия — 16,5; номинальная мощность — 110–184 кВт (ЯМЗ-236) и 132–243 кВт (ЯМЗ-238); частота вращения коленчатого вала при номинальной мощности 2100 об/мин.

Впускные и выпускные клапаны ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 автомобилей МАЗ, КрАЗ, «Урал» изготовлены из специальных жаропрочных сталей. Рабочая фаска выпускного клапана ЯМЗ-238 наплавлена жаропрочным сплавом типа «стеллит», к стержню приварен наконечник из легированной стали. Для повышения износостойкости торцы стержней впускных и выпускных клапанов закалены ТВЧ. Размер тарелок впускных клапанов 61,5 мм, выпускных клапанов — 48 мм, толщина стержня 12 мм.

Впускной клапан изготавливают из стали ЭН107. Клапан подвергают закаливанию с последующим отпускком. Твердость HRC 35–40. Твердость торца стержня клапана HRC 50–57.

Выпускной клапан сварной, к верхней части стержня клапана стыковой сваркой приварен наконечник, который изготовлен из стали 40ХН, а клапан — из стали ЭН69. Выпускной клапан подвергают закалке и отпуску, твердость HRC 25–30, твердость торца стержня клапана на глубине 2–3 мм равна HRC 50–57.

В качестве наплаваемого материала применяли прутки стеллита марки ВЗКР производства ОАО «Торезтвёрдосплав» (сплав вольфрама и хрома, связанных кобальтом и железом) диаметром 8 мм, со следующими параметрами (табл. 1).

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 1

Характеристика наплавляемого сплава

Химический состав, %				Твердость
C	Cr	Ni	Co	HRC, ед
1,0–1,3	28–32	0,5–2,0	основа	48

При наплавке применяли горючий газ ацетилен и кислород. Тип газового пламени, используемый при наплавке, выбирается в зависимости от химического состава наплавляемого материала (табл. 2).

При наплавке сплава использовали флюс на основе буры и борной кислоты. Мощность пламени выбирали в зависимости от размеров детали. При наплавке клапанов применяли восстановительное (нормальное) или науглероживающее (с небольшим избытком ацетилена) пламя. Перед началом наплавки клапан подогревали до температуры 50–100 °С.

Исследования макро- и микроструктуры наплавленного слоя проводили по пробе № 1 (клапан, наплавленный стеллитом без механической обработки) и пробе № 2 (клапан, наплавленный стеллитом и механически обработанный, готовый к установке на двигатель).

Выпускной клапан после наплавки (проба № 1) имеет характерный вид, при котором наплавленный слой хорошо просматривается (рис. 3).

Образцы для металлографического исследования отбирались с тарелки клапана в поперечном сечении. На рисунке 4 представлена макроструктура основного металла и наплавленного слоя без механической обработки. Наплавленный слой однородный, не содержит видимых дефектов (трещин, пустот). Твердость наплавленного слоя составляет 68–70 ед. HRA.

Микроструктуру наплавленного слоя без механической обработки исследовали при увеличениях 50× (рис. 5), 200× (рис. 6) и 1000× (рис. 7).

Характерный внешний вид наплавленного клапана после механической обработки представлен на рисунке 8. Микроструктура наплавленного и обработанного

слоя максимальной толщиной 0,70 мм представлена на рисунке 9.

Механическая обработка клапанов включает в себя обточку тарелки клапана по наружному диаметру до номинального размера на токарном станке резцами с твердосплавными пластинами, предварительную обработку фаски на токарном станке и обработку фаски шлифованием под номинальный размер.

Таблица 2

Термодинамические характеристики газовой смеси

Параметры	Горючий газ
	Ацетилен C_2H_2
Теплотворная способность, кДж/м ³	52800
Температура пламени в смеси с кислородом, °С	3100–3200
Удельный расход кислорода, м ³ /м ³	2,5



Рисунок 3 Характерный внешний вид клапана после наплавки стеллитом

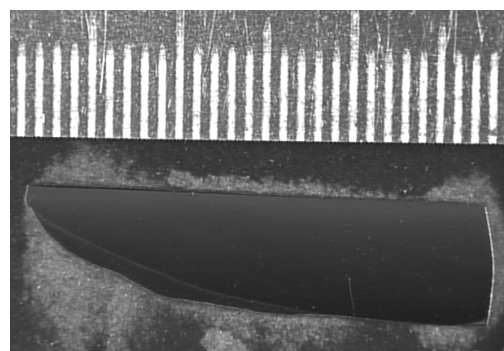


Рисунок 4 Макроструктура поперечного сечения тарелки клапана с наплавкой

После механической обработки наблюдается уменьшение размера зерна микроструктуры наплавленного слоя примерно в 1,5 раза (рис. 10).

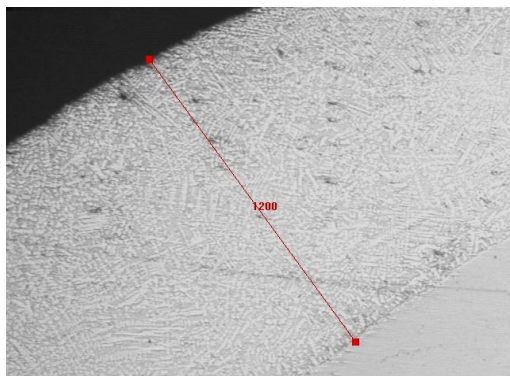


Рисунок 5 Микроструктура наплавленного слоя максимальной толщины 1,2 мм

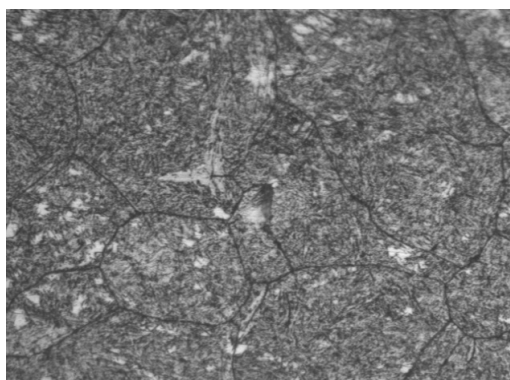


Рисунок 6 Микроструктура наплавленного слоя без травления

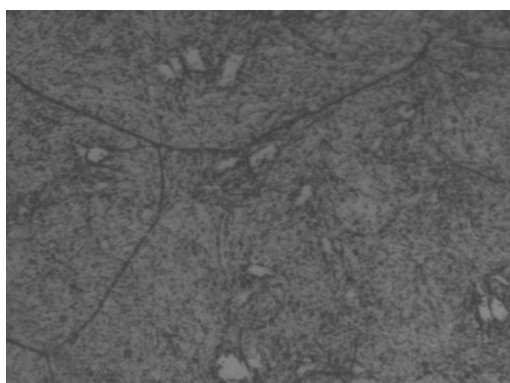


Рисунок 7 Микроструктура наплавленного слоя после травления универсальным травителем



Рисунок 8 Клапан, наплавленный стеллитом и механически обработанный

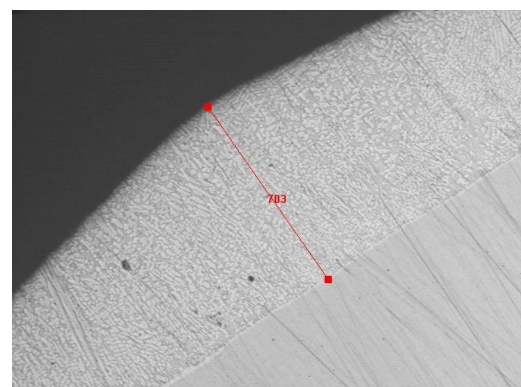


Рисунок 9 Микроструктура наплавленного слоя после механической обработки (максимальной толщиной 0,70 мм, без травления при увеличении 50×)

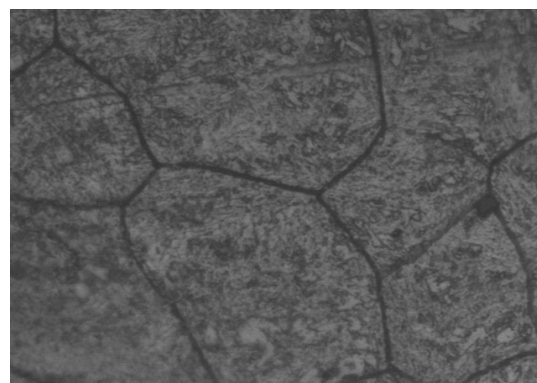


Рисунок 10 Микроструктура наплавленного слоя после травления универсальным травителем (проба № 2, увеличение 1000×)

Это объясняется, с одной стороны, тем, что в процессе технологической обработки наблюдается интенсивная пластическая деформация поверхностного слоя, обуславливающая приобретение кристаллическими зернами однородной текстуры. С другой стороны, при механической обработке генерируются высокие температуры. В частности, при шлифовании и при скоростном точении температура обрабатываемого слоя может достигать 800–850 °С, что приводит к фазовым и структурным превращениям наплавленного слоя, которые положительно влияют на повышение прочностных характеристик кромки поршня [4].

Основные выводы по результатам работы:

1. В результате проведенных исследований установлено, что метод ручной газопламенной наплавки приемлем для применения в условиях автотранспортных предприятий. Он позволяет как осуществлять ремонт единичных клапанов ГРМ ДВС, так и выполнять их восстановление совместно с упрочнением комплекта клапанов ДВС при его ремонте.

2. Предложено использование ручной газопламенной наплавки материала типа стеллита в виде прутка на малые поверхности восстанавливаемых деталей, позволяющей наносить слой толщиной 1,4–1,7 мм.

3. При проведении исследований по газопламенной наплавке фасок клапанов установлено, что данный метод позволяет обеспечить высокое качество наплавленного слоя по всей толщине и твердость порядка 68–70 ед. HRA. В наплавленном слое не обнаружено макро- и микротермических дефектов (трещин, раковин, пустот и т. д.), способствующих механическому разрушению наплавленного слоя.

4. При газопламенной наплавке и дальнейшей механической обработке наплавленного слоя наблюдается повышение его прочностных характеристик.

В ходе дальнейшей работы предполагается установка наплавленных клапанов на двигатель автомобиля с целью определения качества и ресурса их работы в условиях реальной эксплуатации.

Библиографический список

1. Колчин, А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст] : учеб. пособ. для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. — [4-е изд., стер.]. — М. : Высш. шк., 2008. — 496 с.
2. Бабанин, А. Я. Анализ работы деталей технологического узла «клапан — седло — направляющая втулка» газораспределительного механизма ДВС [Текст] / А. Я. Бабанин, А. В. Чухаркин // Промышленность и сельское хозяйство. — 2020. — № 12 (29). — С. 21–26.
3. Бабанин, А. Я. Влияние вида топлива на надежность работы технологического узла «клапан — седло — направляющая втулка» газораспределительного механизма ДВС [Текст] / А. Я. Бабанин, А. В. Чухаркин // Строитель Донбасса. — 2021. — № 1 (14). — С. 10–15.
4. Доценко, А. И. Основы триботехники [Текст] : учебник / А. И. Доценко, И. А. Буяновский. — М. : ИНФРА-М, 2017. — С. 33.

© Бабанин А. Я.

© Чухаркин А. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТИ Куберским С. В.,
д.т.н., проф., зав. каф. АДиА ДонНАСА Братчуном В. И.**

Статья поступила в редакцию 01.12.2021.

Doctor of Technical Sciences Babanin A. Ya., Chukharkin A. V. (*DonNABA, Makeyevka, a.v.chukharkin@donnasa.ru*)

HARDENING AND RECOVERING SURFACING OF VALVES OF THE GAS DISTRIBUTION MECHANISM OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

The paper presents the research results on recovering the geometric dimensions and increasing the strength characteristics of the valves' faces of internal combustion engine during their repair by manual gas-flame surfacing of a stellite-based material with subsequent machining. The modes of manual gas-flame surfacing the material in the form of a rod on small surfaces of the restored parts have been worked out, allowing to apply a metal layer of 1,4–1,7 mm and ensure high quality of the surfaced layer over the entire thickness with a hardness of about 68–70 units HRA. It was found out that the mechanical treatment of the surfaced layer contributes to an increase in the strength characteristics of the surfaced layer by reducing the grain score of the surfaced layer microstructure.

Key words: *internal combustion engine, gas distribution mechanism, valve, seating, surfacing, machining, microstructure, strength of the surfaced layer.*

УДК 621.771.27

д.т.н. Снитко С. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, snitko_sa@mail.ru),
Денищенко Н. П.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, nd76696@gmail.ru),
д.т.н. Яковченко А. В.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, mond1991@mail.ru),
к.т.н. Денищенко П.Н.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, pavel.denischenko@gmail.com)

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ КРУГЛЫХ ПРОФИЛЕЙ

Разработана усовершенствованная калибровка для прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600», которая обеспечивает улучшение устойчивости специального овального раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном, и одновременное его обжатие по дну и боковым стенкам ручьев круглого калибра в момент захвата. На базе конечно-элементного моделирования установлено, что в этом случае во всём объёме очага деформации имеют место сжимающие нормальные напряжения, действующие по вертикальной оси. Также исключаются опасные для сплошности металла соответствующие растягивающие нормальные напряжения.

Ключевые слова: прокатка круглых профилей; калибровка предчистового овального калибра с выпуклым дном; конечно-элементное моделирование процесса прокатки; самоцентрировка овального раската в круглом калибре; нормальные напряжения, действующие в очаге деформации.

Повышение качества круглых профилей, получаемых прокаткой, является актуальной задачей. Её решение рассмотрено в работах [1–6] и др. На практике для прокатки круглых профилей широко применяется система калибров «овал — круг». Известно, что недостатком однорадиусного овала в системе калибров «овал — круг» является плохая устойчивость раската в круглом калибре. Даже в случае применения пропусков незначительная «свобода» раската приводит к его «сваливанию», что снижает точность размеров круглых профилей и способствует образованию дефектов.

Двухрадиусный овал позволяет обеспечить более интенсивную деформацию и устойчивость полосы, а также более чистую поверхность готового проката. Однако необходимо отметить, что здесь на базе двух дуг окружностей выполняют не только боковые контуры ручья овального калибра, но и его дно. Указанные боковые контуры ручья овального калибра формируют на овальном раскате участки, которые в следующем проходе обжимаются

как дном, так и боковыми стенкам ручьев круглого калибра. В момент захвата овальный раскат, в зависимости от предусмотренной вытяжки, контактирует с круглым калибром на определенном расстоянии от плоскости выхода металла из очага деформации. Соответственно, вертикальная плоскость, параллельная плоскости выхода металла из очага деформации, проведенная на указанном расстоянии, пересекает поверхность вала в зоне калибра по сложной кривой. Поэтому выполнить контур овального калибра двумя радиусами, причем таким образом, чтобы соответствующий овальный раскат в момент захвата в круглом калибре обеспечил одновременный контакт по дну и боковым стенкам ручьев круглого калибра, не представляется возможным.

Значения радиусов овальных двухрадиусных калибров на практике определяют на базе эмпирических данных. Поэтому в момент захвата не обеспечивается одновременный по периметру круглого калибра контакт с поверхностью овального раската,

и при незначительном отклонении оси овала от оси калибра возникает крутящий момент в очаге деформации, что снижает устойчивость раската в калибре и приводит к снижению точности размеров и способствует образованию дефектов. Наряду с этим отсутствие в момент захвата одновременного контакта и одновременного обжатия металла по дну и боковым стенкам ручьев круглого калибра не создает условий для возникновения во всем объеме очага деформации сжимающих нормальных напряжений, действующих по вертикальной оси. Это способствует образованию опасных для сплошности металла зон, в которых действуют соответствующие растягивающие нормальные напряжения.

Поставлена задача повышения качества круглых профилей за счет повышения точности их размеров путем улучшения устойчивости овального раската, который в мо-

мент захвата одновременно контактирует с дном и боковыми стенками ручьев круглого калибра, и исключения во всем объеме очага деформации опасных для сплошности металла растягивающих нормальных напряжений, действующих по вертикальной оси.

Овальный калибр выполнен симметрично относительно его горизонтальной и вертикальной осей, соответственно, на рисунке 1 рассмотрена одна его четвертая часть. Здесь имеется три участка. Первый участок обжимается дном круглого калибра. Второй участок обжимается боковой стенкой ручья круглого калибра. Граница этих участков на рисунке 1 имеет координаты (z_1, y_1) . Третий участок, который лежит справа от точки с координатами (z_2, y_2) , сформирован дном овального калибра и при прокатке в круглом калибре перемещается в уширение.

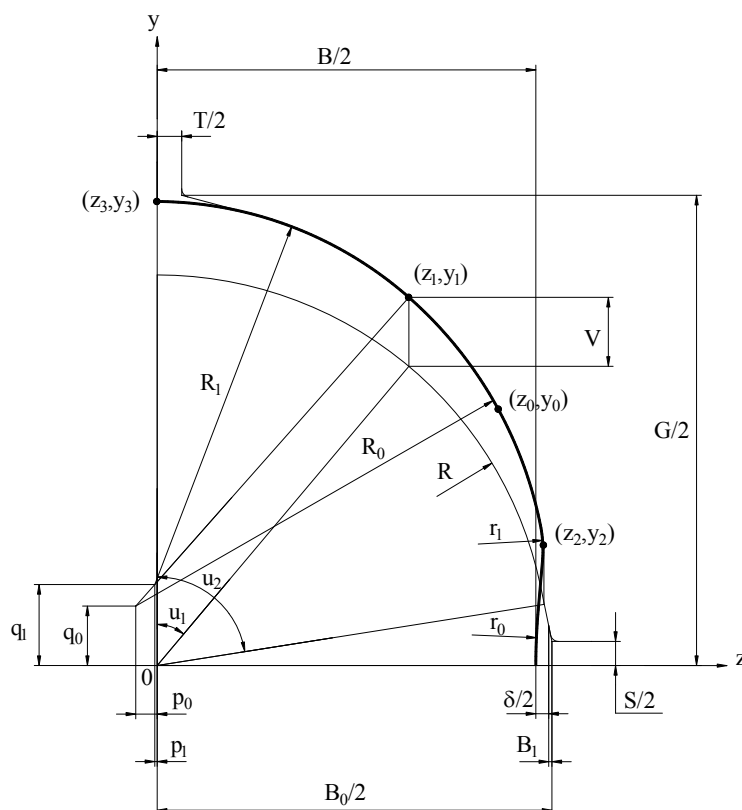


Рисунок 1 Совмещенное построение контуров круглого и овального (с выпуклым дном) калибров и соответствующих раскатов в плоскости yoz

Найдём поверхность вращения (относительно оси валка, имеющего диаметр D) дуги окружности l (рис. 2), имеющей радиус R , с центром в точке $(z_u = 0, y_u = \frac{D}{2} - h + R)$, которая описывает контур ручья круглого калибра.

На рисунке 2 показано положение сечения поверхности круглого калибра после указанной замены переменных.

Из уравнения окружности $(z - z_u)^2 + (y - y_u)^2 = R^2$ находим уравнение дуги l (рис. 2):

$$y = y_u - \sqrt{R^2 - (z - z_u)^2}. \quad (1)$$

Чтобы получить уравнение поверхности, образованной вращением дуги l вокруг оси валка, нужно в уравнение (1) вместо y подставить выражение для радиуса вращения R_{ep} произвольной точки кривой, которое имеет вид

$$R_{ep} = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (2)$$

В результате этой подстановки получим

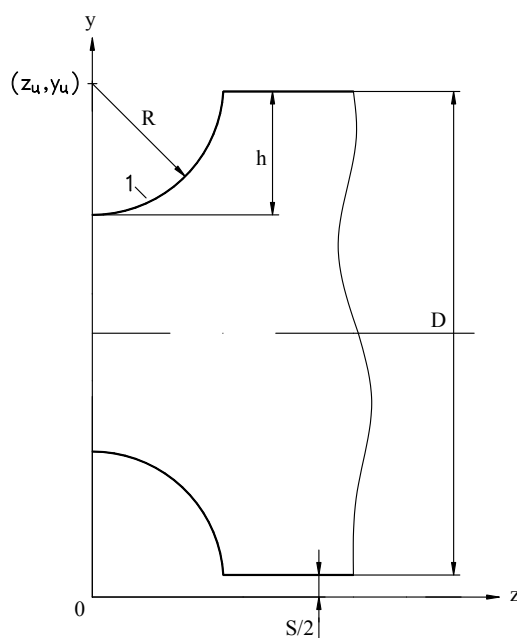
$$\sqrt{X^2 + Y^2} = y_u - \sqrt{R^2 - (Z - z_u)^2}, \quad (3)$$

где X, Y, Z — координаты точки на поверхности вращения дуги l .

Возведя обе части уравнения (3) в квадрат и выполнив замену переменных $Y^* = Y + \frac{D}{2} + \frac{S}{2}$, получим известное уравнение поверхности вращения дуги l (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} X^2 + \left(Y^* - \frac{D}{2} - \frac{S}{2} \right)^2 - \\ - y_u^2 + 2y_u \sqrt{R^2 - (Z - z_u)^2} - \\ - R^2 + (Z - z_u)^2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Рассмотрим последовательность проектирования овального калибра. На основе выражения (4) определим радиусы R_0 и R_1 дуг окружностей (рис. 1), которые образовали боковые контуры каждого ручья овального калибра.



1 — дуга окружности радиуса R с центром в точке (z_u, y_u) , которая описывает контур ручья круглого калибра

Рисунок 2 Контур сечения валка в плоскости yoz

Для этого необходимо выполнить расчет координат точек контура сечения поверхности вала в зоне круглого калибра (рис. 2) плоскостью uoz , которая расположена на расстоянии L от плоскости выхода раската из очага деформации (L — длина очага деформации) (рис. 3).

Если рассмотренный контур сечения поверхности вала в зоне круглого калибра будет также и контуром овального раската (и, соответственно, овального калибра) при $0 \leq z \leq z_2$, то это и обеспечит одновременный контакт соответствующего овального раската с круглым калибром в первый момент касания и выполнение условия $L = \text{const}$ в указанном диапазоне по его ширине при установившемся процессе прокатки.

Из рисунка 1 видно, что $z_3 = 0$, а $z_1 = R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot u_1\right)$, где u_1 — угол, разделяющий контуры донной и боковой частей ручья круглого калибра.

Максимальное значение $z_2 = z_k$ (формула для расчёта z_k определена в работе [5]), тогда угол u_2 , соответствующий контуру ручья круглого калибра, включающему его донную и боковую части, равен

$$u_2 = u_{2\max} = \frac{180}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{z_k}{R}\right). \quad (5)$$

Если $z_2 < z_k$, тогда

$$u_2 = \frac{180}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{z_2}{R}\right). \quad (6)$$

Выражение для координаты y_1 (рис. 1) имеет вид

$$y_1 = \left(\frac{S}{2} + h - R\right) + \sqrt{R^2 - z_1^2} + V, \quad (7)$$

где V — обжатие металла в ручье круглого калибра в точке, соответствующей углу u_1 .

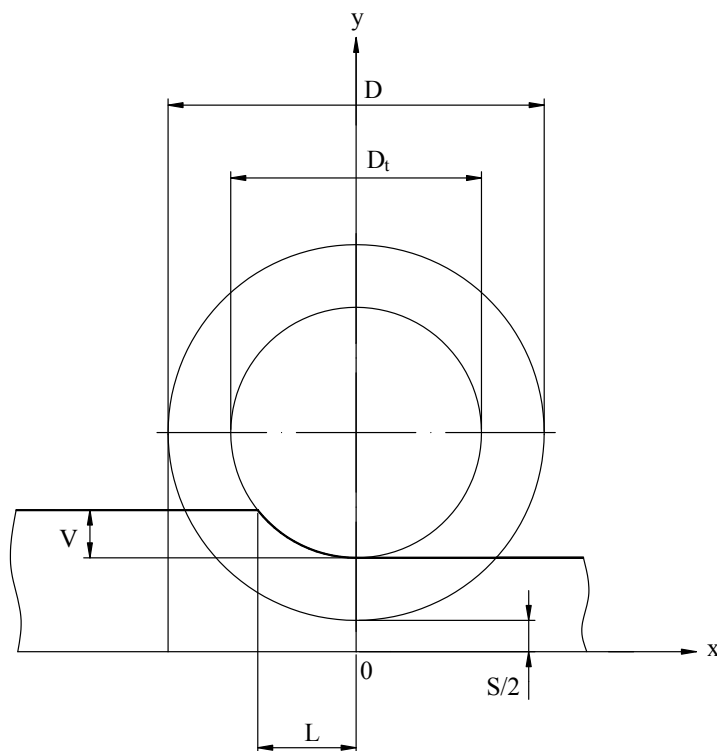


Рисунок 3 Сечение вала в зоне круглого калибра и овального раската в плоскости uoz (сечение выполнено при $z = z_1$ (рис. 1), $D_t = D + S - 2Y_t$)

Значения V и u_1 определяют координаты точки (z_1, y_1) на боковом контуре ручья овального калибра, в которой сопряжены дуги окружностей с радиусами R_0 и R_1 . Значение V определяется из условия равенства вытяжки $\mu = S_z/S_k$ (при прокатке овального раската в круглом калибре) её заданному по эмпирическим данным значению.

При значениях координат точки контакта (z_1, y_1) соответствующая координата x_1 , равная длине очага деформации L , определяется из уравнения (4) и имеет известный вид:

$$L = \sqrt{-\left(y_1 - \frac{D}{2} - \frac{S}{2}\right)^2 + y_u^2 - 2y_u\sqrt{R^2 - (z_1 - z_u)^2} + R^2 - (z_1 - z_u)^2}. \quad (8)$$

При значениях координат $x_1=L$ и z_2 из уравнения (4) определяется координата y_2 :

$$y_2 = \frac{S}{2} + \frac{D}{2} - \sqrt{-L^2 + y_u^2 - 2y_u\sqrt{R^2 - (z_2 - z_u)^2} + R^2 - (z_2 - z_u)^2}. \quad (9)$$

Аналогично, при значениях координат $x_1=L$ и z_3 , из уравнения (4) определяется координата y_3 :

$$y_3 = \frac{S}{2} + \frac{D}{2} - \sqrt{-L^2 + y_u^2 - 2y_u\sqrt{R^2 - (z_3 - z_u)^2} + R^2 - (z_3 - z_u)^2}. \quad (10)$$

Аналогично, при значениях координат $x_1=L$ и z_0 , из уравнения (4) определяется координата y_0 :

$$y_0 = \frac{S}{2} + \frac{D}{2} - \sqrt{-L^2 + y_u^2 - 2y_u\sqrt{R^2 - (z_0 - z_u)^2} + R^2 - (z_0 - z_u)^2}. \quad (11)$$

Затем, используя уравнение поверхности вращения (4), при $x_1=L$ в диапазоне $0 \leq z \leq z_2$ определяется (с шагом Δz) массив точек контура сечения круглого калибра $y = f(z)$.

Для практического использования результатов необходимо контур $y = f(z)$, состоящий из множества точек, аппроксимировать двумя дугами с радиусами R_0 и R_1 (рис. 1). Контур $y = f(z)$, который определен найденным выше массивом точек, на завершающем этапе используется для оценки точности указанной аппроксимации.

Радиус R_0 и соответствующие координаты центра дуги (p_0, q_0) находим из условия прохождения ее через три точки с координатами (z_0, y_0) , (z_1, y_1) , (z_2, y_2) . Подставив координаты каждой из указанных точек в уравнение поверхности вращения (4), получаем систему 3-х уравнений для определения искомых величин.

Радиус R_1 и соответствующие координаты центра дуги (p_1, q_1) находим из условия прохождения ее через две точки с координатами (z_3, y_3) , (z_1, y_1) , а также условия общей касательной в точке (z_1, y_1) для дуг с радиусами R_0 и R_1 . То есть также получаем систему 3-х уравнений для определения искомых величин. Решая эти системы уравнений, получаем следующие формулы:

$$\begin{aligned} R_0 &= \sqrt{(z_2 - p_0)^2 + (y_2 - q_0)^2}, \\ R_1 &= \sqrt{(z_1 - p_1)^2 + (y_1 - q_1)^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где z_2 — заданная по эмпирическим данным ширина контакта овального раската с круглым калибром в момент захвата.

$$\begin{aligned} p_0 &= \frac{(w_1 \cdot v_2 - w_2 \cdot v_1)}{(g_1 \cdot v_2 - g_2 \cdot v_1)}, \\ q_0 &= \frac{(w_1 \cdot g_2 - w_2 \cdot g_1)}{(g_2 \cdot v_1 - g_1 \cdot v_2)}, \\ g_1 &= 2 \cdot (z_2 - z_1), \\ v_1 &= 2 \cdot (y_2 - y_1), \\ w_1 &= z_2^2 + y_2^2 - z_1^2 - y_1^2, \\ g_2 &= 2 \cdot (z_2 - z_0), \\ v_2 &= 2 \cdot (y_2 - y_0), \\ w_2 &= z_2^2 + y_2^2 - z_0^2 - y_0^2, \\ p_1 &= \frac{-E - 2(y_1 - y_3)(y_1 - z_1 \cdot F)}{2(z_1 - z_3) + 2(y_1 - y_3) \cdot F}, \\ q_1 &= (y_1 - z_1 \cdot F) + p_1 \cdot F, \\ E &= (z_3^2 - z_1^2) + (y_3^2 - y_1^2), \\ F &= \frac{y_1 - q_0}{z_1 - p_0}. \end{aligned} \quad (13)$$

Проектируемый овальный калибр (рис. 1) образован двумя ручьями в прокатных валах и разъемом между ними. Боковые контуры каждого ручья овального калибра, расположенные между его разъемом (зазором), равным T , и дном, выполнены двумя сопряженными в точке с координатами (z_1, y_1) дугами окружностей с радиусами R_0 и R_1 . Одна часть бокового контура ручья овального калибра, расположенная между его разъемом и точкой с координатами (z_1, y_1) , выполнена дугой окружности с радиусом R_1 . Другая часть бокового контура ручья овального калибра, расположенная между точками с координатами (z_1, y_1) и (z_2, y_2) , выполнена дугой окружности с радиусом R_0 .

Дно овального калибра расположено между точками с координатами (z_2, y_2) и $(z = B/2, y = 0)$. Дно ручья овального калибра проектируется по эмпирическим данным. У овального калибра с вогнутым дном (рис. 1) контуры бокового участка и дна могут сопрягаться дугой окружности с радиусом r_1 . Также в его контуре может быть предусмотрена дуга окружности с радиусом r_0 , имеющая координаты центра $(z = B/2 - r_0, y = 0)$. Дуги окружностей с радиусами r_1 и r_0 могут быть сопряженными между собой или могут быть сопряженными отрезком прямой линии.

Высота овального калибра G (рис. 1) зависит от его выпуска, который задается по эмпирическим данным. Если овальный калибр проектируется без выпуска, то его высота равна $G = 2y_3$.

Ширина овального калибра B (рис. 1) (соответственно, и ширина овального раската) задается по эмпирическим данным с учетом величины уширения металла δ при прокатке в круглом калибре. При этом незаполнение круглого калибра равно B_1 (рис. 1).

В зависимости от диаметра круглого профиля, ширины бокового участка овального калибра, определяемой координатой z_2 , уширения металла δ и заданной вытяжки в круглом калибре μ овальный калибр может быть спроектирован с вогнутым, плоским или выпуклым дном.

Учет заданной вытяжки выполняется путём реализации нескольких итерационных циклов расчетов. Так, если вытяжка $\mu = S_z/S_k$ (соответствующая контуру овального калибра, полученному после первого цикла расчетов) окажется, например, меньше заданной величины, то значение величины V (рис. 1, 3), входящей в формулу (7), увеличивается с некоторым шагом, если больше, то уменьшается. При переходе от увеличения к уменьшению и наоборот шаг делится пополам (то есть используется метод половинного деления). С

учетом измененных значений V каждый раз проектируется скорректированный контур овального калибра. В итоге находятся значения: V и, соответственно, L , а также радиусы R_0 и R_1 , при которых площадь сечения овального подката соответствует заданной вытяжке с требуемой точностью.

На основе разработанных математических формул создана компьютерная программа, окно которой показано на рисунке 4. Чертежи круглого и овального (с выпуклым дном) калибров (и соответствующих раскатов) для прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600» показаны на рисунке 5.

Реализация моделирования процесса прокатки специального овального раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном (рис. 1), выполнена в системе Deform-3D. Результаты моделирования показаны на рисунках 6–11. Адаптация метода конечно-элементного моделирования применительно к решению такого рода задач выполнена в работе [7]. Методика исследований изложена в работах [6, 7]. В работе [6] также выполнено конечно-элементное моделирова-

ние процесса прокатки специального овального раската, полученного в овальном калибре с вогнутым дном. Результаты здесь использованы для сравнительного анализа выявленных закономерностей напряженно-деформированного состояния металла в рассмотренных очагах деформации.

Результаты конечно-элементного моделирования процесса самоцентрировки овала специальной формы, имеющего наклон на угол 5° , при его прокатке в круглом калибре представлены на рисунке 7.

На рисунке 7, а показан первый момент контакта овала, который наклонен на угол 5° , с круглым калибром. Значения радиусов овала R_0 и R_1 , показанные на рисунках 1, 4, 5, определены на базе математической модели (12) и специализированной компьютерной программы (рис. 4) и обеспечивают одновременный контакт овального раската специальной формы с круглым калибром в первый момент касания и, соответственно, одинаковую длину очага деформации, равную 71,585 мм (рис. 4), по всей его ширине в процессе прокатки.

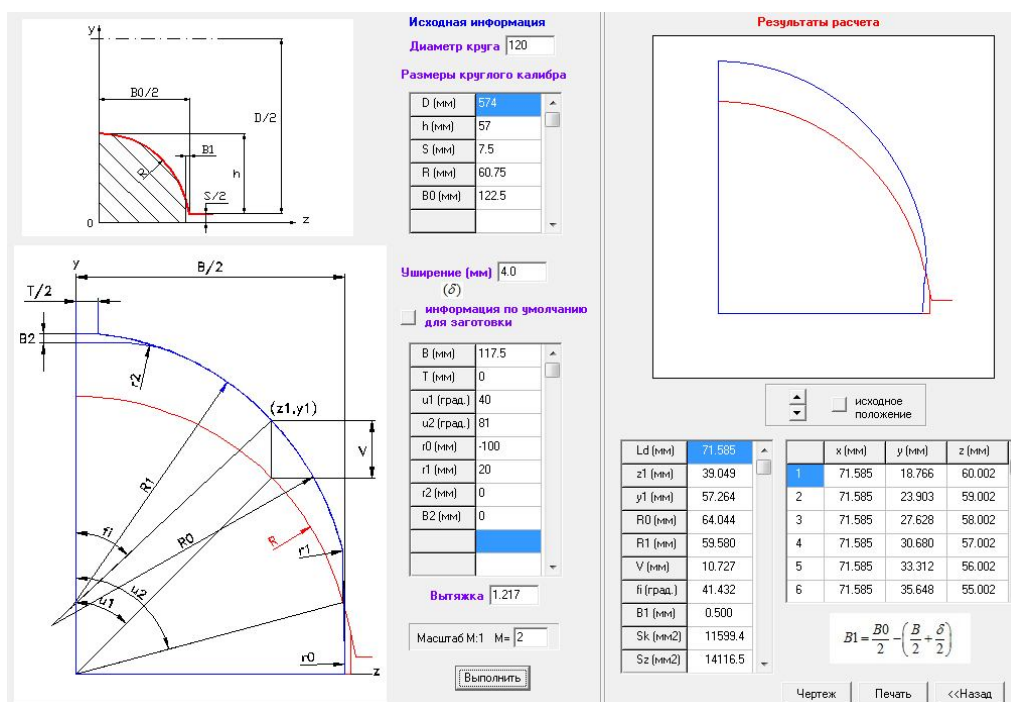


Рисунок 4 Окно программы проектирования калибровок валков для прокатки круглых профилей по системе калибров «овал — круг»

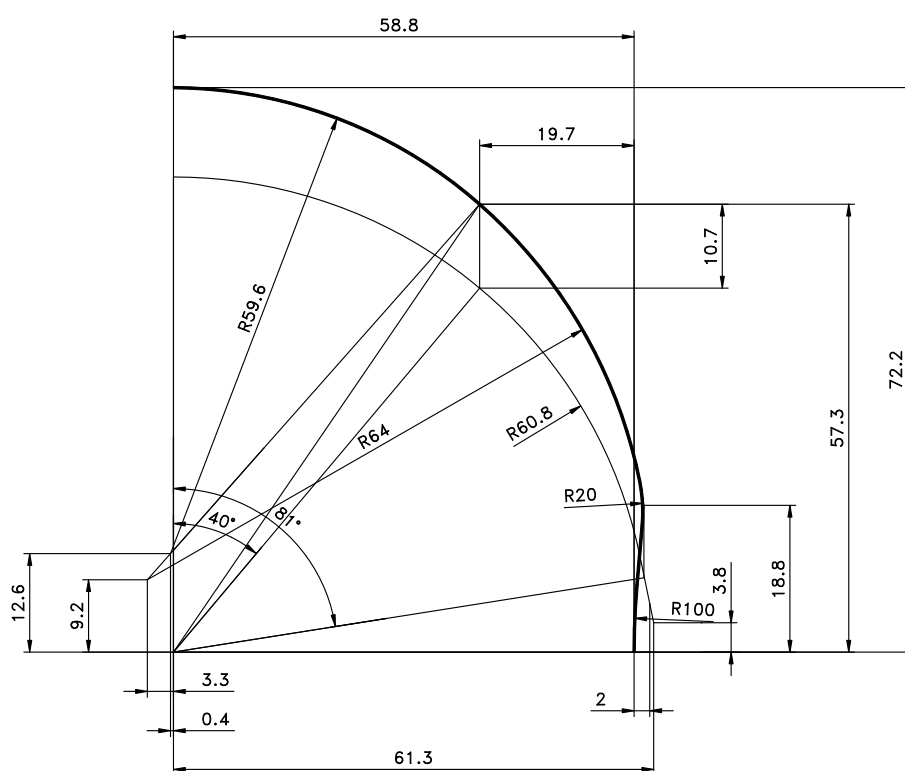


Рисунок 5 Чертеж специального овального раската, совмещенного с калибром прокатки круглого профиля диаметром 120 мм на крупносортом стане «600»

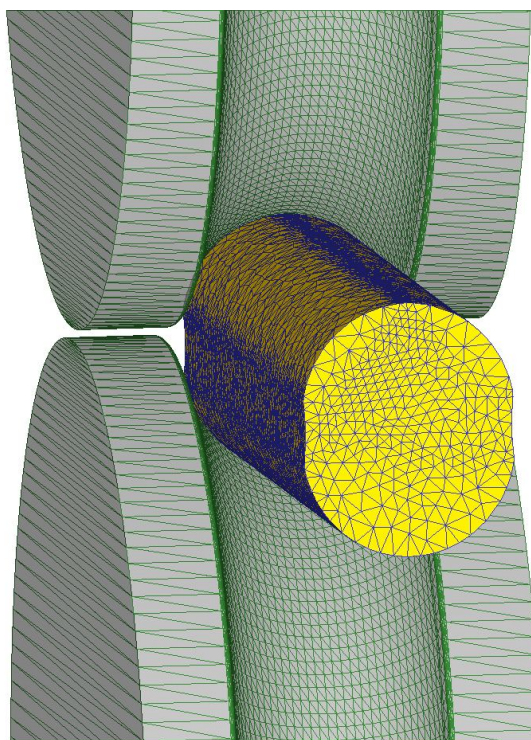
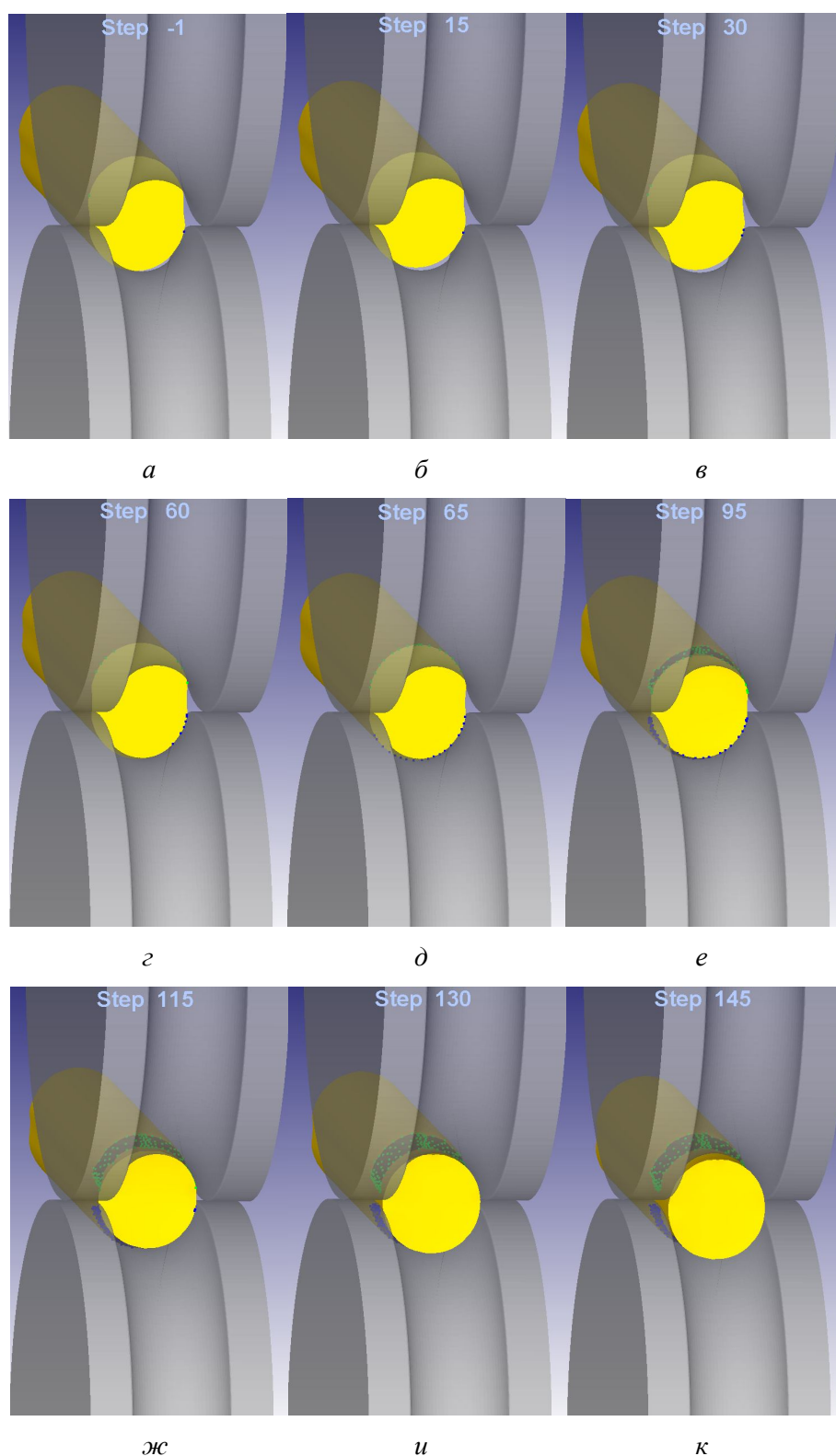
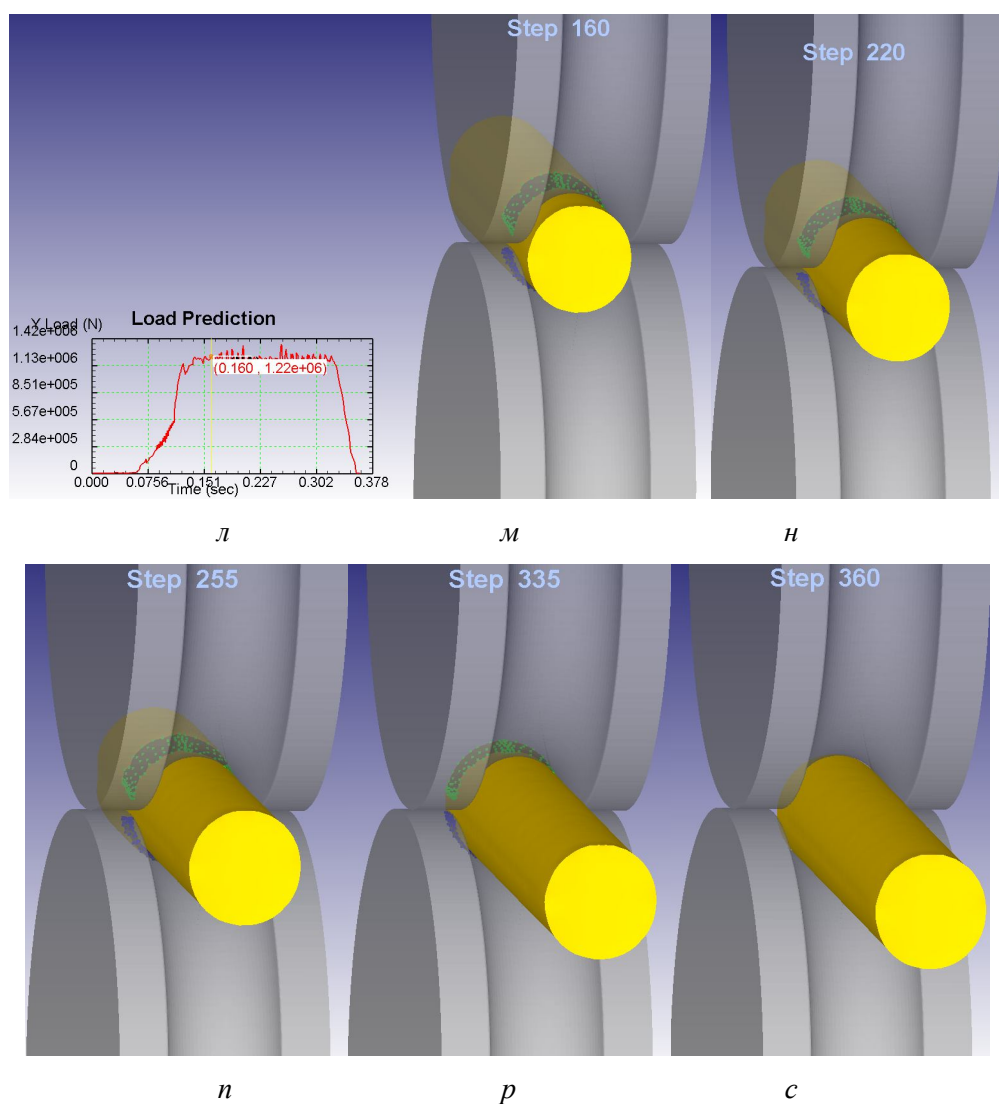


Рисунок 6 Визуализация сетки конечных элементов при задаче раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном, в круглый калибр в процессе прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600»



а–г — самоцентрировка овала специальной формы, имеющего наклон на угол 5° , в круглом калибре;
 д–ж — заполнение очага деформации; и–к — образование внешней зоны на выходе из очага деформации

Рисунок 7 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки



л — график силы прокатки; м–с — завершающий этап моделирования процесса прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600»

Продолжение рисунка 7

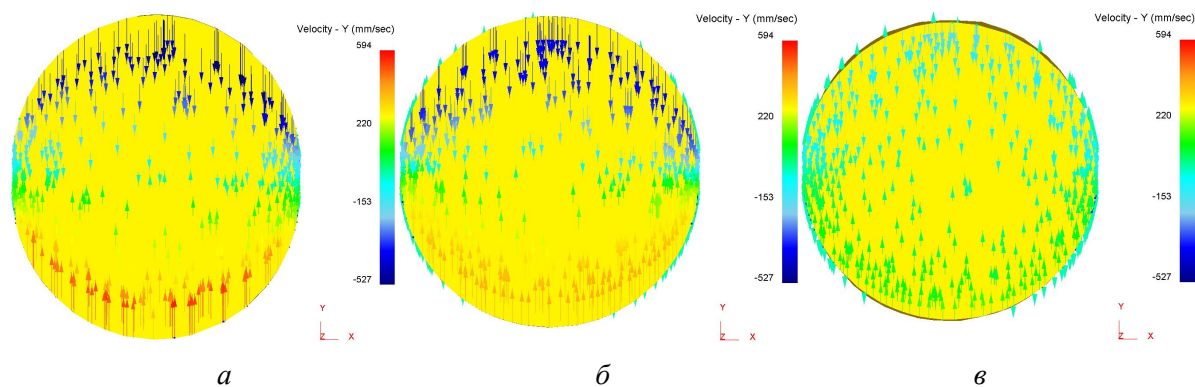


Рисунок 8 Распределение векторов скорости по вертикальной оси:
а — при захвате; б — в средней части очага деформации; в — на выходе из очага деформации

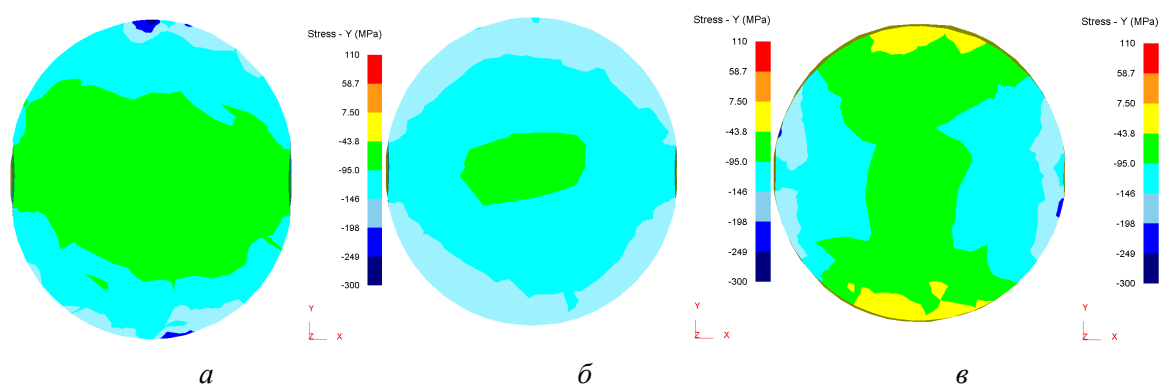


Рисунок 9 Распределение нормальных напряжений по вертикальной оси:
а — при захвате; б — в средней части очага деформации; в — на выходе из очага деформации

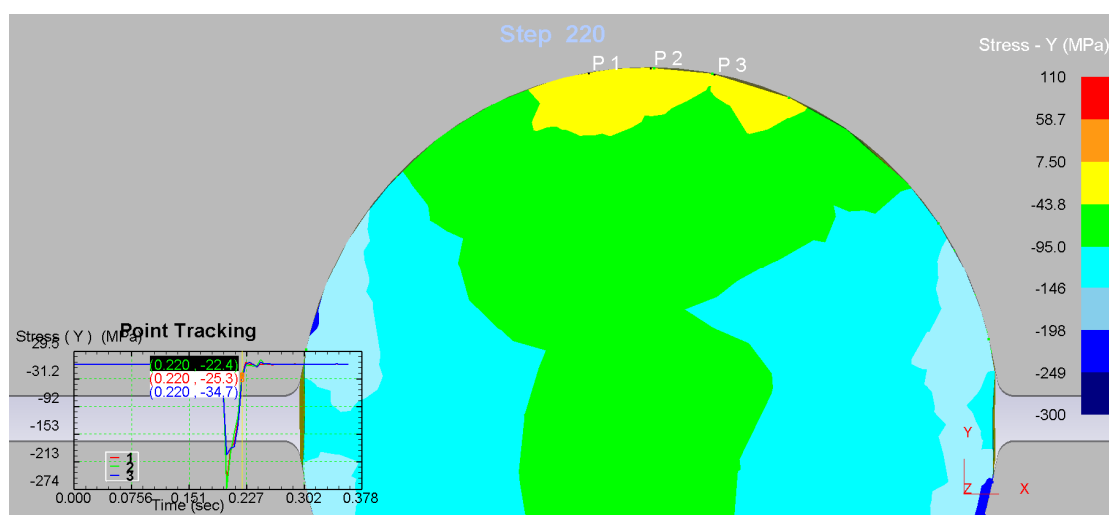


Рисунок 10 Результаты расчета значений сжимающих нормальных напряжений, действующих по вертикальной оси, в точках P1, P2, P3 на поверхности контакта металла с валком (рис. 9, в)

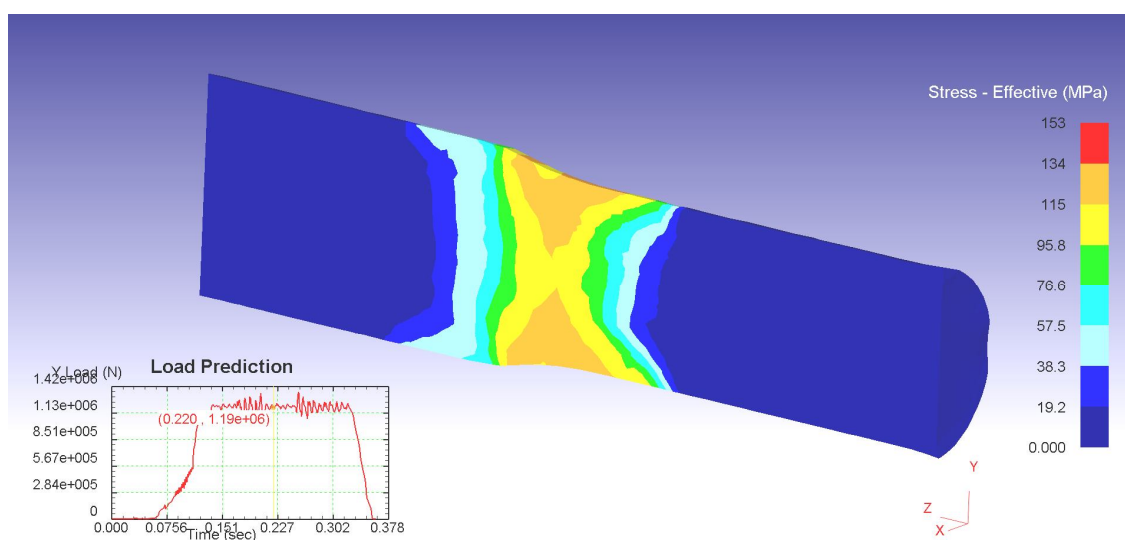


Рисунок 11 Распределение эквивалентных напряжений по длине очага деформации

Самоцентрировка в том случае, когда по причине нарушения технологии прокатки возникает наклон овала, обеспечивается за счет действия сил, показанных в работе [6]. Её реализация становится возможной благодаря тому, что в первый момент контакта металла с валками верхняя и боковые части контура овального раската совпадают с контуром сечения круглого калибра вертикальной плоскостью на расстоянии, равном длине очага деформации от плоскости выхода металла из валков. На рисунке 5, *з* показано устойчивое положение овала, полученное после его самоцентрировки.

При конечно-элементном моделировании, показанном на рисунке 7, процесс самоцентрировки овала специальной формы завершился на 60-м шаге (рис. 7, *з*). Здесь и на рисунке 7, *в* зелеными точками показано, что имеет место контакт овала с круглым калибром по всей ширине раската. После этого начинается обжатие овального раската в круглом калибре. Видно, что постепенно увеличивается длина очага деформации. При этом она остаётся величиной постоянной по ширине очага деформации, причем как при заполнении калибра металлом, так и при установившемся процессе прокатки, а также при выходе заднего конца раската из очага деформации (рис. 7, *р*). На рисунках 7, *м–с* показан завершающий этап моделирования процесса прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600». Одновременное обжатие металла по дну и боковым стенкам ручьев круглого калибра, начиная с первого момента касания овального раската круглого калибра и до конца прокатки, создает условия для возникновения во всём объёме очага деформации сжимающих нормальных напряжений, действующих по вертикальной оси. При этом исключаются опасные для сплошности металла соответствующие растягивающие нормальные напряжения.

В процессе моделирования выполнен расчёт силы прокатки. На рисунке 7, *л* показан график силы при прокатке круга диаметром 120 мм на стане «600».

На рисунке 8 показано распределение векторов скорости течения металла, на рисунке 9 — распределение нормальных напряжений по вертикальной оси (*а* — при захвате; *б* — в средней части очага деформации; *в* — на выходе из очага деформации).

Анализ полученных на рисунках 9, 10 результатов позволяет сделать вывод о том, что при прокатке в круглом калибре овального раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном, во всём объёме очага деформации имеют место сжимающие нормальные напряжения, действующие по вертикальной оси. При этом, как показали расчеты, вертикальные нормальные напряжения, действующие в приконтактных слоях раската в зоне дна калибра, знак не изменяют (рис. 9, *в*, 10) и составляют ~27 МПа. То есть они остаются, по-прежнему, сжимающими.

На рисунке 11 показано распределение эквивалентных напряжений по длине очага деформации, которые используются при расчете силы прокатки.

Выполнен сравнительный анализ выявленных закономерностей напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при прокатке в круглом калибре овальных раскатов, полученных в овальных калибрах с вогнутым [6] и выпуклым дном. Установлено, что при прочих равных условиях снижение высотного обжатия овального подката на 11,4 % и, соответственно, уширения — на 27,3 % (при прокатке овального раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном) приводит к тому, что ширина контактной поверхности подката с валками при захвате увеличивается на 6,7 % и по длине очага деформации практически не меняется. Таким образом, при такой калибровке (и, соответственно, при таких форме и размерах овального подката) возрастает роль боковых стенок калибра в условиях, когда обжатие металла по стенкам и дну круглого калибра начинается одновременно. В результате этого реализуется схема течения металла, при которой обес-

печивается повышение уровня сжимающих вертикальных напряжений в зоне боковой поверхности формируемого круглого раската. Это особенно хорошо заметно на входе в очаг деформации и в средней его части по длине (рис. 9, а, б).

Выводы:

1. Для условий прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600» разработана усовершенствованная калибровка, являющаяся основным элементом технологии прокатки, которая обеспечивает улучшение устойчивости специального овального раската и одновременное его обжатие по дну и боковым стенкам ручьев круглого калибра в момент захвата.

2. Впервые на базе конечно-элементного моделирования установлено, что при прокатке в круглом калибре овального раската специальной формы, полученного в овальном калибре с выпуклым дном, в условиях, когда обжатие металла по боковым стенкам и дну круглого калибра начинается одновременно, во всём объёме очага деформации имеют место сжимающие нормальные напряжения, действующие по вертикальной оси.

3. Выполнен сравнительный анализ выявленных закономерностей напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при прокатке в круглом калибре овальных раскатов, полученных в овальных калибрах с вогнутым и выпуклым дном. Установлено, что при прочих равных условиях снижение высотного обжатия овального подката на 11 % и, соответственно, уширения — на 27 % (при прокатке овального раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном) приводит к тому, что ширина контактной поверхности подката с валками при захвате увеличивается на 7 % и по длине очага деформации практически не меняется. В условиях, когда обжатие металла по стенкам и дну калибра начинается одновременно, возрастает роль боковых стенок калибра и реализуется схема течения металла, при которой обеспечивается повышение уровня сжимающих вертикальных напряжений в зоне боковой поверхности формируемого круглого раската.

Библиографический список

1. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка : справочник [Текст]. Том I / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев ; под ред. Б. М. Илюковича. — Днепрпетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. — 506 с.
2. Hong, H. Roll pass design and simulation on continuous rolling of alloy steel round bar / H. Hong // *Procedia Manufacturing : 9th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS'2019)*. — 2019. — Vol. 37. — P. 127–131.
3. Бахтинов, В. Б. Технология прокатного производства / В. Б. Бахтинов. — М. : Металлургия, 1983. — 486 с.
4. Пат. 102915 Украина, МПК (2012) B21B 1/02. Способ прокатки круглых профилей / Шум В. Б., Яковченко А. В., Никишин В. М., Курилов А. В., Гайдук Р. Е., Борискин В. В. ; владелец патента Донецкий национальный технический университет. — № a201200925 ; заявл. 30.01.2012 ; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. — 6 с. : ил.
5. Снитко, С. А. Математическая модель поверхности круглого калибра / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко // *Вестник Донецкого национального технического университета*. — 2020. — Том 20. — № 4. — С. 43–48.
6. Снитко, С. А. Исследование процесса самоцентрировки овального раската специальной формы в круглом калибре на базе метода конечных элементов / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении : сб. науч. тр.* — 2021. — Том 36. — № 3. — С. 72–82.

7. Снитко, С. А. Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската в круглом калибре / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко, В. В. Пилипенко // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 23 (66). — С. 32–39.

© Снитко С. А.
© Денищенко Н. П.
© Яковченко А. В.
© Денищенко П. Н.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В.,
к.т.н., доц., помощником начальника СПЦ по технологии
филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» Чичканом А. А.*

Статья поступила в редакцию 14.12.2021.

Doctor of Technical Sciences Snitko S. A., Denishchenko N. P., Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V., PhD in Engineering Denishchenko P. N. (DonSTI, Alchevsk, LPR, pavel.denischenko@gmail.com)

DEVELOPMENT OF THE THEORY AND TECHNOLOGY OF ROLLING ROUND PROFILES

An improved calibration has been developed for rolling a circle with a diameter of 120 mm on a 600 mill, which improves the stability of a special oval roll obtained in an oval pass with a convex bottom, and its simultaneous compression along the bottom and side walls of round pass streams at the time of capture. On the basis of finite-element modeling, it is determined that in this case, the compressive normal stresses acting along the vertical axis take place in the entire volume of the deformation focus. The corresponding tensile normal stresses, which are dangerous for the metal continuity, are also excluded.

Key words: *rolling of round profiles; calibration of a pre-finishing oval pass with a convex bottom; finite-element modeling of the rolling process; self-centering of an oval roll in a round pass; normal stresses acting in the deformation area.*

УДК 669.162

к.т.н. Диментьев А. О.,

к.т.н. Должиков В. В.,

Михайлюк Г. Д.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, dimentev@inbox.ru),

к.т.н. Карнов А. В.

(ЛГТУ, г. Липецк, РФ)

ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗЕЙ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАВКИ С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ХОДА ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ РАЗЛИЧНОГО ОБЪЕМА

В работе приведены результаты статистического исследования связей основных показателей работы доменных печей разного объема (производительность печи и удельный расход топлива) с интенсивностью плавки. Определено, что зависимости между ними не имеют экстремального характера, отмеченного в ряде исследований, но при этом они достаточно надежно связаны линейно.

Ключевые слова: доменная печь, производительность печи, удельный расход топлива, интенсивность плавки, связи показателей доменной плавки.

Основным техническим показателем работы доменной печи является ее производительность, а экономическим — себестоимость чугуна, в составе которой затраты на топливо (кокс + добавки) обычно являются наибольшими.

Сравнение работы разных доменных печей, особенно в отношении их удельной производительности и расхода кокса, наталкивается на ряд трудностей. Они возникают вследствие того, что и производительность, и расход кокса определяются в той или иной степени всеми технологическими параметрами и шихтовыми условиями плавки.

Еще в прошлом веке в металлургии чугуна начали использовать понятие интенсивности плавки (или форсирования хода доменной печи). Под интенсивным ходом доменной печи понимали способ ведения плавки с максимально возможным количеством подаваемого в печь дутья. В этом случае, при неизменных шихтовых условиях, достигали наибольшей производительности [1].

Однако для различных по размерам печей максимально возможное количество дутья отличается, поэтому использовать этот параметр доменной плавки для сравнения работы разных по объему металлургических агрегатов неправомерно.

В связи с этим для выделения влияния интенсивности хода доменной печи на основные показатели плавки — суточную производительность (Pr) и удельный расход кокса (K) — определяют разные показатели интенсивности. Они чаще всего представляют собой показатели плавки, отнесенные к единице объема (или площади сечения) печи в единицу времени [1–3].

Пользуются:

а) коэффициентом использования полезного объема печи, представляющим полезный объем печи ($V_{пол}$), приходящийся на тонну суточной выплавки чугуна:

$$КИПО = \frac{V_{пол}}{Pr};$$

б) количеством израсходованного кокса (интенсивностью горения) в час на 1 м^2 сечения горна — J ;

в) количеством дутья в единицу времени на 1 м^2 сечения горна или количеством газов на 1 м^2 сечения распара, примерно пропорциональным интенсивности горения J (п. б);

г) объемной интенсивностью горения кокса или интенсивностью плавки по коксу (количеством кокса в сутки на 1 м^3 полезного объема печи) — I_k .

$$I_k = \frac{K \cdot Pr}{V_{пол}}.$$

При применении природного газа или других восстановителей объемная интенсивность определяется количеством суммарного углерода кокса и восстановителей, поступивших в сутки на 1 м^3 полезного объема печи;

д) количеством дутья в минуту на 1 м^3 полезного объема доменной печи — V_d/V_n и рядом других показателей интенсивности плавки.

Все эти показатели тесно связаны между собой. Чаще всех используется интенсивность плавки по коксу.

В работе [3] приведены зависимости различных удельных показателей производительности и интенсивности плавки по коксу от полезного объема доменных печей. Показатели рассчитаны по результатам компьютерного моделирования доменной плавки в печах разного объема при одинаковых условиях плавки. Оказалось, что с ростом полезного объема доменных печей показатели удельной производительности и интенсивности плавки по коксу уменьшаются.

Однако авторы исследования не приводят практических данных, подтверждающих результат исследования. В реальных условиях работы печей интенсивность плавки по коксу колеблется в довольно широких пределах.

Характерной особенностью современной доменной плавки является использование значительного количества (до 50 %), дополнительного к коксу, топлива: угольной пыли и природного газа. При этом большая доля фурменного газа, создающего сопротивление опусканию шихтовых материалов, образуется при сгорании вдуваемого топлива. В связи с этим более представительно выражать производительность (Pr) доменной печи в виде произведения двух ее составляющих — балансовой (Pr_b) и газодинамической (Pr_g) [2]:

$$Pr = Pr_b \cdot Pr_g.$$

Балансовая составляющая производительности является функцией суммы расхода кокса, расхода вдуваемого топлива (BT) и содержания кислорода (ω) в дутье:

$$Pr_b = f \cdot [(K + BT) \cdot \omega].$$

Авторы не указывают вид функции, а значит, и способ ее расчета. Физический смысл балансовой составляющей производительности — выплавка чугуна на 1 м^3 газа, образующегося в печи. Следует отметить, что вид и химический состав BT , особенно при вдувании газообразного топлива, будут существенно влиять на количество образующегося газа, что никак не отражено в формуле.

Более полувека назад была установлена экстремальная зависимость Pr и K от интенсивности плавки по коксу (I_k) [1], подтвержденная затем и другими исследователями. Причем экстремальные значения Pr и K достигаются при разных значениях I_k . Объясняется это особенностями изменений характеристик газового потока в доменной печи с изменением I_k [2, 4].

В представленной работе решались задачи выявления связей показателей интенсивности плавки с объемом печей и экстремальными значениями Pr и K .

Эффективным средством обобщения результатов работы доменных печей является использование методов математической статистики, которые не являются абсолютным средством при изучении взаимосвязей сложных процессов, по причине формализованного подхода, присущего всем математическим методам исследования [5–7].

Сочетание статистических расчетов с технологическим анализом дает возможность значительно обогатить наши представления о доменном процессе, а также прийти к серьезным практическим выводам и рекомендациям.

В исследовании использовали процедуры анализов распределений, регрессионного и корреляционного, а также отдельные элементы дисперсионного анализа [5].

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В качестве данных для статистического анализа использовали выборки суточных результатов работы шести доменных печей двух металлургических предприятий. Исходные данные были подвергнуты первичной обработке, в ходе которой удалены периоды с простоями и так называемым тихим ходом длительностью более 30 минут.

Для изучения структуры данных рассматривали гистограммы, таблицы частот, временные ряды показателей.

Анализ данных позволил выделить периоды для исследования, в которых:

а) не было выбросов — кратковременных периодов (1–2 суток) с существенным отличием по производительности;

б) отличался компонентный состав используемого топлива (К+ПГ (природный газ), К+ПГ+ПУТ (пылеугольное топливо)) длительностью более 10 сут.

При выделении периода по пункту б удалены временные интервалы перехода по компонентному составу используемого топлива.

Основные статистические характеристики исследуемых показателей приведены в таблице 1. Средние значения являются средними по указанной выборке.

Необходимо отметить, что минимальные и максимальные значения показателей в таблице не являются таковыми в строгом смысле.

Таблица 1

Основные статистические характеристики исследуемых показателей (%)

№	Полезный объем печи, м ³	Длительность периода, сут.	Суточное производство, т/сут.		Расход кокса, кг/т чугуна		Расход топлива, кг/т чугуна	
			среднее	max	средний	min	средний	min
1	2000	196	5100	5370	420	399	500	480
2	2000	75	6150	6300	380	360	480	460
		824	5770	6650	307	230	488	415
3	3000	461	6010	6850	-	-	531	460
4	3200	812	7780	8660	310	273	498	460
5	3900	174	8490	8820	330	305	505	470
6	4300	608	12160	13040	404	373	504	470

Продолжение таблицы 1

№	Полезный объем печи, м ³	I_m^* , т/(м ³ ·сут.)			КИПО, м ³ ·сут./т чугуна	V_d/V_n	Состав топлива
		при min расходе T	средний	при max P_r			
1	2000	1,22	1,28	1,34	0,39	1,87	К + ПГ
2	2000	1,44	1,48	1,52	0,33	2,065	К + ПГ
		1,27	1,41	1,54	0,35	2,060	К+ПГ+ ПУТ
3	3000	0,78	1,03	1,25	0,50	1,90	К + ПГ
4	3200	1,09	1,21	1,33	0,41	1,80	К+ПГ+ ПУТ
5	3900	1,01	1,10	1,13	0,46	1,50	К+ПГ+ ПУТ
6	4300	1,46	1,59	1,68	0,35	1,72	К + ПГ

*С нашей точки зрения, употребление названия интенсивность плавки по коксу и обозначения I_k не соответствует реальному содержанию понятия при плавке с использованием дополнительных вдуваемых топлив. Поскольку в расчете показателя общий расход топлив суммируется (с использованием различных весовых коэффициентов), логичнее назвать рассматриваемый показатель интенсивностью плавки по топливу с обозначением — I_m .

Они рассчитывались для каждого показателя следующим образом. По таблице частот определяли границу минимального (максимального) значения показателя и прилегающий интервал, включающий 30–40 значений больше (меньше) минимального (максимального). Из полученной выборки, чтобы исключить влияние случайных отклонений, выделяли последовательные по времени интервалы длиной не менее 3-х суток. По отобранным интервалам рассчитывали средние значения, а затем, из совокупности полученных средних, выбирали наименьшее (наибольшее).

Полученные результаты не позволяют утверждать, что интенсивность плавки по топливу зависит от объема доменных печей (рис. 1).

Можно отметить тенденцию уменьшения интенсивности плавки по топливу с увеличением объема печей, если исключить из рассмотрения данные по доменной печи 6 объемом 4300 м³. Для уточнения наличия вышеуказанной связи, очевидно, требуются дополнительные исследования.

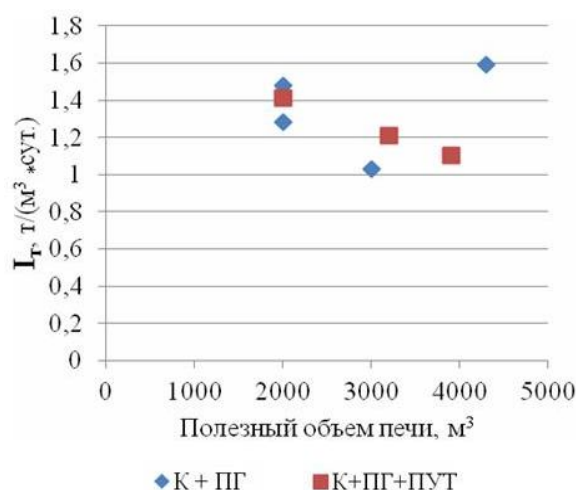


Рисунок 1 Связь показателя интенсивности плавки I_m с полезным объемом доменных печей и составом вдуваемого топлива

На рисунке 2 показаны значения различных показателей интенсивности плавки. Данные, показанные на гистограмме, также указывают на отсутствие связи различных показателей интенсивности плавки с объемом доменных печей и компонентным составом вдуваемого топлива.

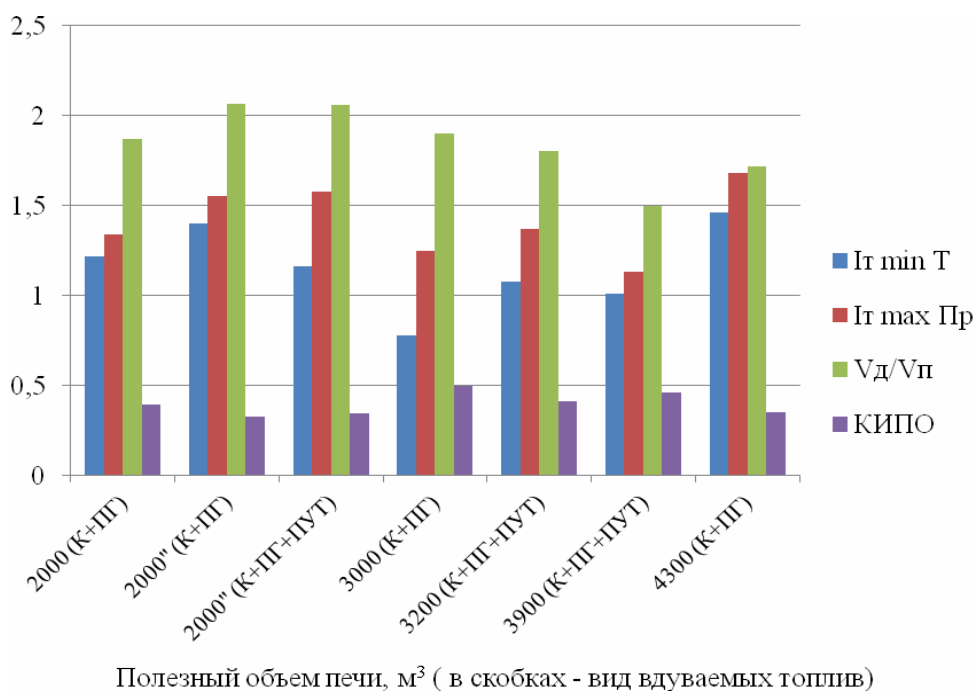


Рисунок 2 Гистограмма сравнения показателей интенсивности плавки

Исследования зависимостей Pr и K от интенсивности плавки по топливу (I_m) не выявили их экстремального характера, отмеченного в работах [1, 2, 4]. При этом в большинстве случаев статистически установлена достаточно надежная линейная зависимость. В таблице 2 приведены значения коэффициентов корреляции между исследуемыми показателями.

Отсутствие экстремумов можно объяснить характером ведения плавки в современных условиях и статистическим (выборочным) методом исследования.

Наличие минимума по расходу кокса объяснялось в предыдущих исследованиях тем, что «...существует вполне определенная область интенсивности хода, при которой расход кокса минимален или близок к минимальному, т. е. имеет место рациональное газораспределение, обеспечивающее максимальное использование газов при ровном ходе шихты. Уменьшение интенсивности ниже оптимальной ведет к неравномерному газораспределению (периферийный ход газов); увеличение — опять-таки к неравномерному газораспределению, связанному с повышением выноса мелких фракций. В обоих случаях неизбежен повышенный расход кокса» [1]. В настоящее время возможности контроля и управления газораспределением позволяют вести плавку с достаточно высокой интенсивностью, ориентируясь на устойчивый «ровный ход» печи.

Таблица 2
Коэффициенты корреляции между исследуемыми показателями

Номер печи в табл. 1	Топливо	Коэффициент корреляции (r) между показателями		
		$I_m - Pr$	$I_m - T$	$T - Pr$
1	К+ПГ	+0,32	+0,75	-0,38
2	К+ПГ	+0,47	+0,63	-0,39
2	К+ПГ+ПУТ	+0,52	+0,64	-0,32
3	К+ПГ	+0,92	+0,49	+0,13
4	К+ПГ+ПУТ	+0,71	+0,35	-0,19
5	К+ПГ+ПУТ	+0,86	+0,62	-0,26
6	К+ПГ	+0,83	+0,42	-0,30

Отсутствие максимума по производительности объясняется ведением плавки без «передувов», т. е. без стремления одномоментно получить высокую производительность. Об этом свидетельствуют небольшие отрицательные коэффициенты корреляции между расходом топлива и производительностью. Повышение интенсивности плавки сопровождается увеличением удельного расхода топлива, но одновременно и в большей степени возрастает производительность. Кроме того, следует учитывать, что изменение ряда параметров (содержание железа в железорудной части шихты и др.) оказывает на производительность печи и расход кокса противоположное влияние.

Для уточнения выводов по рассматриваемому вопросу необходимы дальнейшие исследования.

Выводы:

1. Результаты проведенных исследований по наличию связи между показателями интенсивности плавки и объемом доменных печей неоднозначны.

Поэтому в дальнейшем планируется исследовать технологию выплавки чугуна на доменной печи 6 объемом 4300 м³ с целью выявления причин, позволивших получить столь высокие технико-экономические показатели.

2. Исследования зависимостей суточной производительности печи и удельного расхода от интенсивности плавки по топливу (I_m) не выявили их экстремального характера, отмеченного в ряде исследований. Однако статистически установлена достаточно надежная линейная зависимость между рассматриваемыми показателями доменной плавки.

В дальнейших исследованиях следует уточнить положение экстремумов для зависимости суточной производительности печи и удельного расхода кокса от интенсивности плавки по топливу (I_m).

Библиографический список

1. Готлиб, А. Д. Доменный процесс [Текст] / А. Д. Готлиб. — М. : Металлургия, 1966. — 504 с.
2. Товаровский, И. Г. Доменная плавка [Текст] / И. Г. Товаровский. — [2-е изд.]. — Днепропетровск : Пороги, 2009. — 768 с.
3. Металлургия чугуна [Текст] / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев и др.; под ред. Ю. С. Юсфина. — [3-е изд.]. — М. : Академкнига, 2004. — 774 с.
4. Ефименко, Г. Г. Металлургия чугуна [Текст] / Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб, В. Е. Левченко. — М. : Вища школа, 1981. — 496 с.
5. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом [Текст] / И. Г. Товаровский и др. — М. : Металлургия, 1978. — 264 с.
6. Мельниченко, А. С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении [Текст] : учеб. пособ. / А. С. Мельниченко. — М. : Изд. дом МИСИС, 2009. — 268 с.
7. Коробов, В. И. Статистические исследования доменного процесса [Текст] / В. И. Коробов. — М. : Металлургия, 1977. — 184 с.

© Диментьев А. О.© Должиков В. В.© Михайлюк Г. Д.© Карпов А. В.

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

Статья поступила в редакцию 01.12.2021.

**PhD in Engineering Dimentiev A. O., PhD in Engineering Dolzhikov V. V., Mikhailuk G. D.
(DonSTI, Alchevsk, LPR), PhD in Engineering Karpov A. V. (LSTU, Lipetsk, the Russian Federation)
STUDIES OF LINKS BETWEEN THE MAIN MELTING INDICATORS AND THE DRIVING
RATE INTENSITY OF THE BLAST FURNACES OF DIFFERENT VOLUMES**

The paper presents the results of statistical study of links between the main performance indicators of the blast furnaces of different volumes (furnace performance and specific fuel consumption) with the melting intensity. It is determined that the dependencies between them do not have an extreme character, noted in a number of studies, but at the same time they are quite reliably connected linearly.

Key words: blast furnace, furnace performance, specific fuel consumption, melting intensity, links of blast furnace melting indicators.

**СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**

**CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE**

УДК 624.046

к.т.н. Псюк В. В.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, psuk@rambler.ru),
к.т.н. Антошина Т. В.
(г. Алчевск, ЛНР, tvantos@ukr.net),
Псюк М. Ю.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, marikapt@rambler.ru),
Нукишина И. А.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, frezi9@ukr.net)

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ СОРТОПРОКАТНОГО ЦЕХА ФИЛИАЛА № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС»

В статье приведены результаты оценки напряженно-деформированного состояния конструкций покрытия производственного здания сортопрокатного цеха с учётом фактического технического состояния после длительного периода эксплуатации без надлежащего обслуживания. На основе полученных результатов предложены мероприятия по приведению строительных конструкций здания сортопрокатного цеха в пригодное для нормальной эксплуатации техническое состояние.

Ключевые слова: несущая способность, стропильная ферма, вертикальные и горизонтальные связи, техническое состояние, мониторинг текущего состояния.

Промышленные здания проектируют с учетом специфики предусматриваемых технологических нагрузок и воздействий, района строительства, с учетом собственного веса несущих и ограждающих конструкций. Однако в процессе строительства, эксплуатации происходят отклонения от предусмотренных в проекте конструктивных решений, нагрузок и воздействий, условий эксплуатации. Всё перечисленное, а также длительная эксплуатация без выполнения ремонтно-восстановительных работ приводит к изменению характера работы и снижению несущей способности эксплуатируемых конструкций.

Особенно остро данная проблема стоит для промышленных предприятий черной металлургии, построенных в 60–70-х годах прошлого века и находящихся в эксплуатации. Особенностью эксплуатации промышленных зданий предприятий металлургического комплекса является крайне неудовлетворительное их обслуживание со стороны эксплуатантов, которое заключается в отсутствии проведения регулярных

обследований, выполнения усиления аварийных конструкций, восстановления эксплуатационных характеристик конструкций, имеющих различную степень износа. Всё это, а также изменения действующих нормативных документов по нагрузкам и воздействиям [1] требует при обследовании конструкций предприятий черной металлургии проводить проверочный статический расчёт каркасов зданий с учётом изменившихся условий эксплуатации.

Целью данной работы является определение действующих усилий в конструкциях покрытия с учетом изменений в конструктивной схеме, а также норм по нагрузкам и воздействиям, проверка проектных сечений конструкций покрытия производственного здания сортопрокатного цеха филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» на несущую способность.

Краткая конструктивная характеристика здания. Дата ввода в эксплуатацию сортопрокатного цеха — 1965 г. В январе 2019 г. произошло обрушение металлических конструкций стропильной системы и плит покры-

тия в осях 213–217 пролёта О'–Н'. Здание сортопрокатного цеха на момент обследования (август — сентябрь 2019 г.) находилось в эксплуатации, за исключением температурного блока, где произошло обрушение, и крайнего температурного блока.

В состав здания сортопрокатного цеха входят три продольных пролета: крайние пролеты О'–Н' и М'–К' по 36 м каждый и средний пролет Н'–М' — 24 м.

Участок прокатного цеха в осях 193–233 представляет собой трёхпролетное одноэтажное здание со смешанным каркасом размерами 96 м в рядах О'–К' и 240 м в осях 193–233. Данный участок разбит на температурные блоки размерами 60×96, 84×96, 96×96 м. Высота до низа стропильных конструкций составляет 16,4 м.

За условную отметку $\pm 0,000$ принята отметка головки ж/д рельса и уровня «чистого пола» цеха, абсолютная отметка которого равна 245,000 м.

Фундаменты — отдельно стоящие, монолитные железобетонные.

Колонны ступенчатые, двухветвевые железобетонные с шагом 12 м, кроме мест проездов: на этих участках предусмотрены подстропильные фермы.

По каждому ряду колонн выполнены металлические вертикальные связи.

Покрытие выполнено из металлических стропильных и подстропильных ферм, объединенных горизонтальными и вертикальными связями.

Несущие металлоконструкции покрытия запроектированы в виде системы стропильных и подстропильных ферм с параллельными поясами и связей по ним, по типовой серии ПК-01-32 вып. II. Фермы выполнены из спаренных уголков, с треугольной решеткой.

Покрытие выполнено из железобетонных плит. Кровля — рулонный ковер, с организованным внутренним водостоком.

Здание оборудовано мостовыми кранами и подвесными кран-балками. Подкрановые балки — разрезные двутаврового сечения. Крановый рельс КР-120. Крепле-

ние рельса выполнено прижимными планками на болтах.

Стены выполнены из навесных железобетонных панелей, присутствует кирпичная кладка в местах ворот и дверей. По ряду О' в осях 205–211 проектный выезд из цеха заменен на кладку из шлакоблока до отметки +6,700.

Обслуживающие площадки и лестницы — стальные.

Остекление — ленточное двухъярусное. Двери и ворота автовъездов — распашные, стальные.

Отмостка — асфальтобетонная.

Расчет температурных блоков каркаса здания выполнялся с применением ПК ЛИРА [2] методом конечного элемента, основанного на методе перемещений. Расчетная схема температурного блока каркаса здания в осях 203–217 приведена на рисунке 1.

При моделировании конструкций каркаса здания применялись следующие элементы:

– КЭ 4. Пространственный ферменный стержень. Применялся для моделирования элементов стропильных и подстропильных ферм, связей покрытия;

– КЭ 10. Пространственный стержень общего назначения. Применялся для моделирования колонн, вертикальных связей по колоннам, связей в уровне подкрановых балок, фонарных рам;

– КЭ 41, 42, 44. Треугольный, прямоугольный, четырехугольный соответственно элементы оболочки. Применялись для моделирования подкрановых балок, тормозных балок, траверс колонн, стеновых заполнений и элементов покрытия.

Жесткостные характеристики элементов задавались в соответствии с сечениями, указанными на исходных чертежах марок КМ, АР, КЖ.

Условия закрепления: жесткое защемление для колонн в уровне условной отметки 0,000; шарнирные узлы применены для крепления горизонтальных связей покрытия. Опирающие фермы на колонны приняты шарнирными ввиду применения КЭ 4.

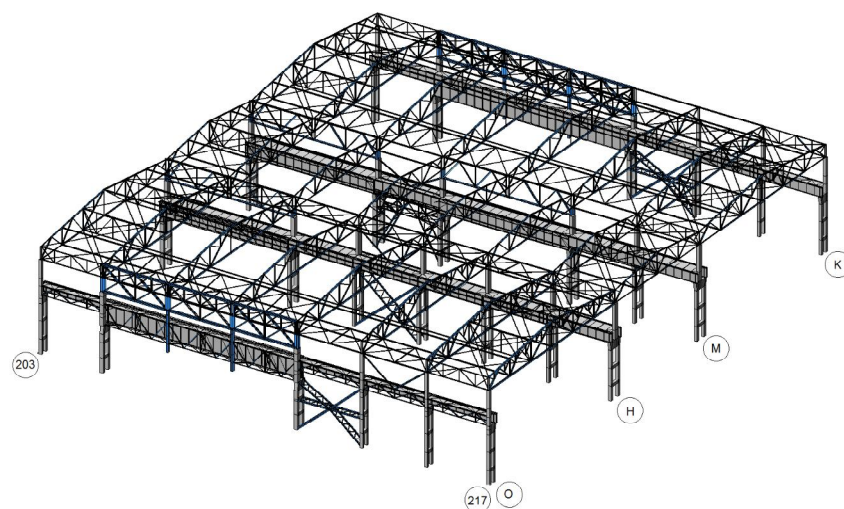


Рисунок 1 Схема температурного блока каркаса здания в осях 203–217

Сбор нагрузок осуществлялся в соответствии с действующими нормами ДБН В.1.2–2:2006 [1]. Определение статических нагрузок приведено на рисунке 2.

Собственный вес элементов каркаса собирается автоматически. При расчете собственного веса элементов задавались следующие переходные коэффициенты к объемному или погонному весу сечений элементов:

- масса стропильных и подстропильных ферм $K=1,15$ для учета деталей опорных узлов, фасонок и соединительных планок;
- масса вертикальных связевых ферм покрытия $K=1,1$ для учета деталей узлов;
- масса подкрановых балок $K=1,01$;

– масса остальных металлических элементов $K=1,05$;

– масса железобетонных элементов $K=1,1$.

Масса стеновых панелей принята усредненной по серии СТ 02-19/61, масса панелей $1,67 \text{ кПа}$ на 1 м^2 площади стен, $K=1,1$.

Масса металлической зашивки определялась по чертежам ПКО, масса зашивки $0,487 \text{ кПа}$ на 1 м^2 площади стеновой зашивки, $K=1,05$.

Масса окон определялась по чертежам ПКО, масса окон с учетом остекления $0,304 \text{ кПа}$ на 1 м^2 площади окна, $K=1,05$.

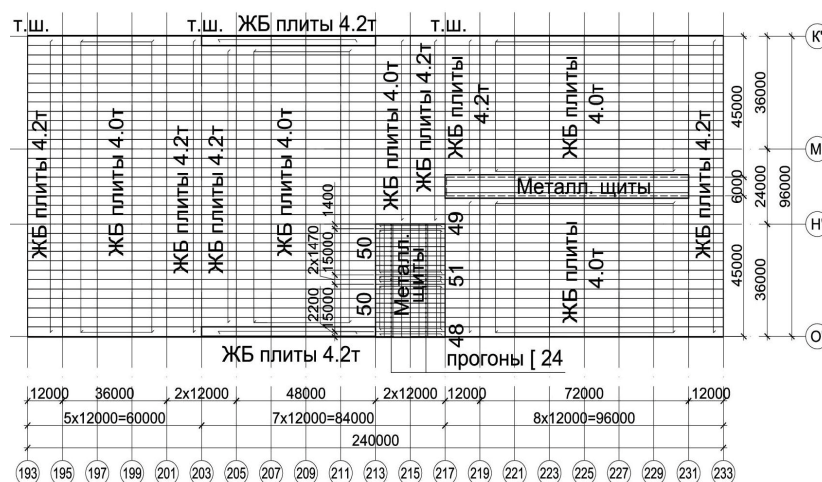


Рисунок 2 План покрытия для сбора нагрузок

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Снеговая нагрузка. Предельное расчетное и эксплуатационное расчетные значения снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия (конструкции) определялись в соответствии с действующими нормами ДБН В.1.2–2:2006 [1]. Варианты снеговых загрузок приведены на рисунке 3.

Ветровая нагрузка. Предельное расчетное и эксплуатационное расчетные значения ветровой нагрузки определялись в соответствии с действующими нормами ДБН В.1.2–2:2006 [1]. Варианты ветровых загрузок приведены на рисунке 4.

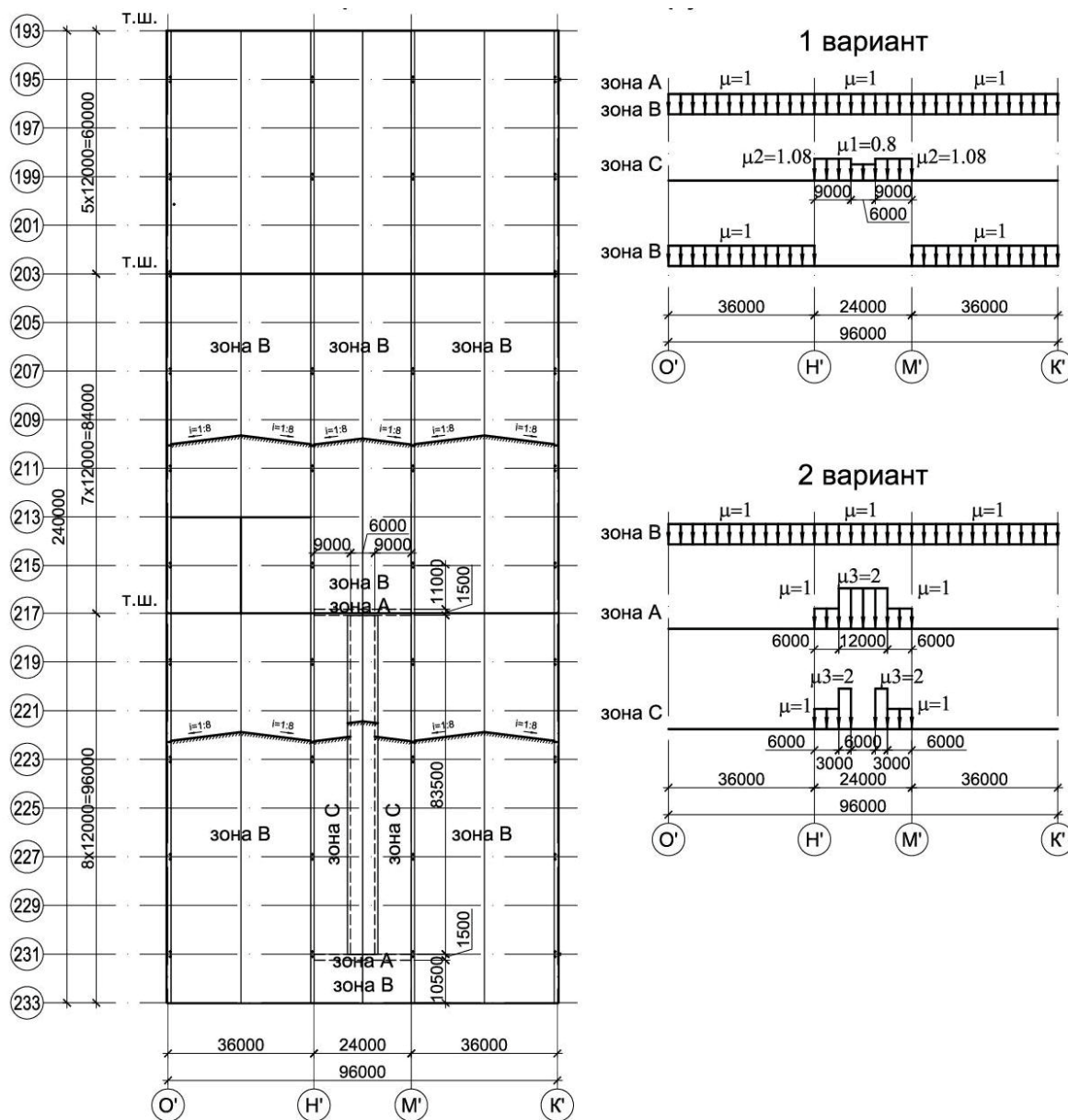


Рисунок 3 Варианты снеговых загрузок

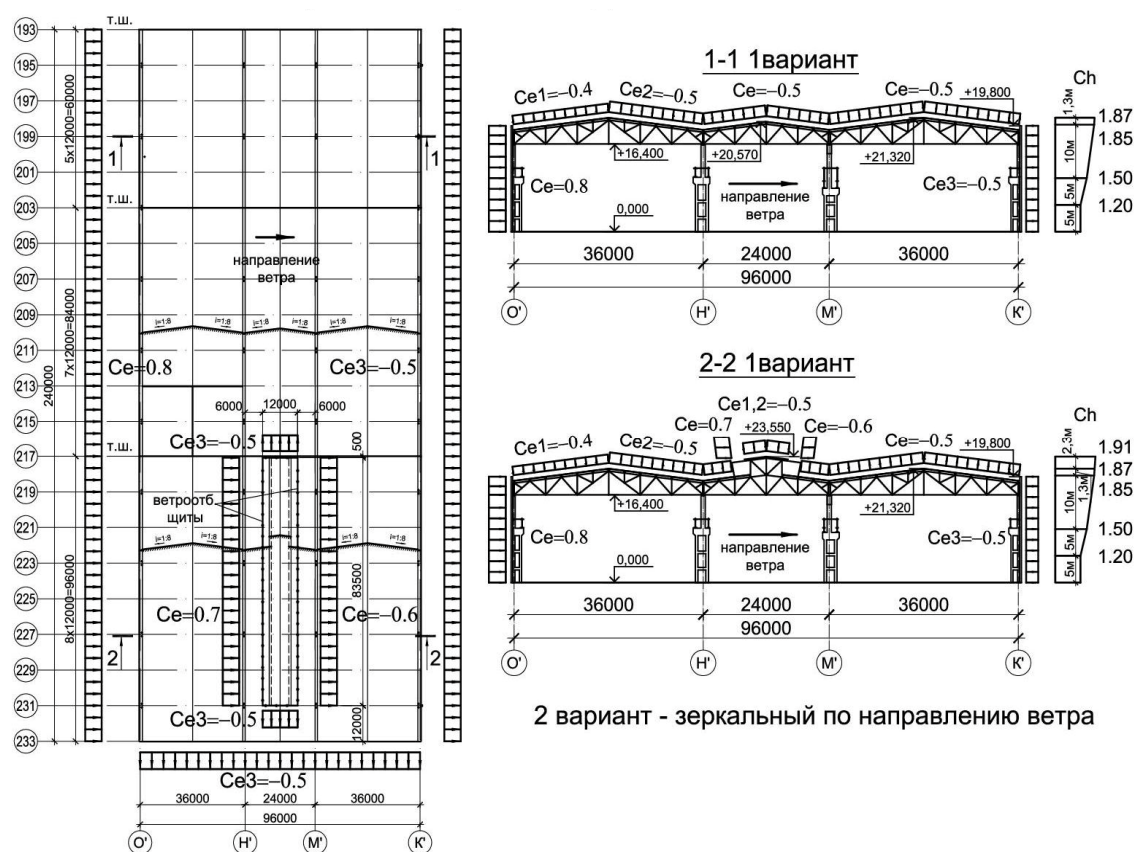


Рисунок 4 Варианты ветровых нагрузений

Нагрузки от мостовых и подвесных кранов. Для ряда крайних колонн по оси О рассматривался вариант от двух наиболее неблагоприятных по воздействию кранов 2А и 3 грузоподъемностью 80/20 т и 75/20 т соответственно. Для ряда крайних колонн по оси К рассматривался вариант от двух наиболее неблагоприятных по воздействию кранов 19 и 20 грузоподъемностью 10+10 т. Для ряда средних колонн по оси Н рассматривался вариант от четырех наиболее неблагоприятных по воздействию кранов 2А, 3 грузоподъемностью 80/20 т и 75/20 т соответственно со стороны пролета О–Н и 9, 10 грузоподъемностью 30/5 т со стороны пролета Н–М. Для ряда средних колонн по оси М рассматривался вариант от четырех наиболее неблагоприятных по воздействию кранов 9, 10 грузоподъемностью 30/5 т со стороны пролета Н–М и 19, 20 грузоподъемностью 10+10 т со стороны пролета М–К.

Крановые нагрузки прикладывались к узлам колонн и подкрановых балок, исходя из следующих предположений:

- вертикальная нагрузка от колес кранов D_{max} или D_{min} через опорные ребра подкрановых балок передается на нижнюю часть колонны в уровне опирания нижнего пояса подкрановых балок;
- боковые силы T действуют только в местах максимальных вертикальных крановых нагрузок (при нахождении тележки максимально близко к крановому пути) и передаются от колес крана через тормозные балки на верхнюю часть колонны в уровне плоскости листа тормозной балки, при этом предполагается, что на колонну передается только опорная реакция тормозной балки;
- продольные силы K вдоль кранового пути от колес крана передаются через рельс на опорные ребра подкрановых балок в уровне верхних поясов балок.

Схема приложения нагрузок на крайние и средние колонны приведена на рисунке 5. Для средней колонны изображен вариант, когда действуют максимальные и минимальные вертикальные крановые нагрузки, а в месте приложения минимальной крановой нагрузки продольные и поперечные силы условно не показаны.

Вертикальные крановые нагрузки. Наибольшая опорная реакция в разрезной балке будет при таком положении системы сил, когда одна из сил находится непосредственно над опорой, а остальные расположены как можно ближе к этой опоре.

Для кранов 2А и 3 грузоподъемностью 80/20 т и 75/20 т соответственно наибольшая опорная реакция от подкрановых балок, передающихся на колонну, при 8 силах будет при расположении над опорой первого колеса с $F_m^{\max} = 416$ кН от крана 3. Для кранов 9 и 10 грузоподъемностью 30/5 т наибольшая опорная реакция от подкрановых балок будет при расположении над опорой первого колеса с $F_m^{\max} = 323$ кН. Для кранов 19 и 20 грузоподъемностью 10+10 т наибольшая опорная реакция от подкрановых балок будет при расположении над опорой второго колеса с $F_m^{\max} = 325$ кН от крана 20. Схемы прило-

жения систем сил и величины вертикальных нагрузок показаны на рисунке 6. Вертикальные нагрузки на промежуточные узлы нижних поясов стропильных ферм определялись от одного подвешного крана при $\psi = 1$, $D_1 = 64$ кН. На узлы подстропильных ферм при расположении монорельсов с двух сторон оси фермы нагрузка принималась от двух кранов с $\psi = 1$, $D_2 = 128$ кН.

При расчете боковых сил от кранов Т, передаваемых на колонну, рассматривались такие же системы сил и коэффициенты сочетаний, как и при определении вертикальной крановой нагрузки с учетом вариантов направления поперечных сил для четырехколесных и восьмиколесных кранов.

Технологические и дополнительные нагрузки. На покрытии здания цеха по оси О' на расстоянии 3 м от парапета (см. рис. 7) расположены два трубопровода: нижняя труба диаметром 630 мм и толщиной стенки 8 мм — для отвода коксового газа; верхняя труба диаметром 250 мм (толщина стенки принята 10 мм) — паровая. Трубопроводы закреплены на железобетонные опоры размерами 620×620×1200 мм с шагом 12 м. Сосредоточенная расчетная (коэф. 1,1) нагрузка от веса труб с опорами при длине участка 12 м составляет 40 кН.

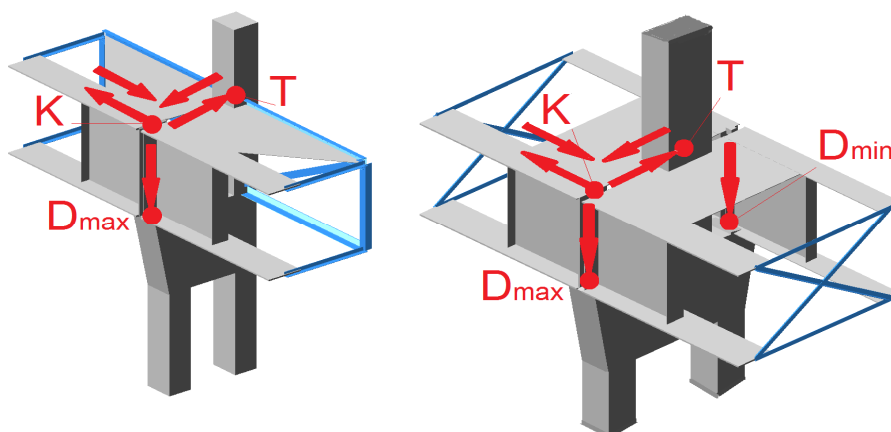


Рисунок 5 Схемы приложения крановых нагрузок

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

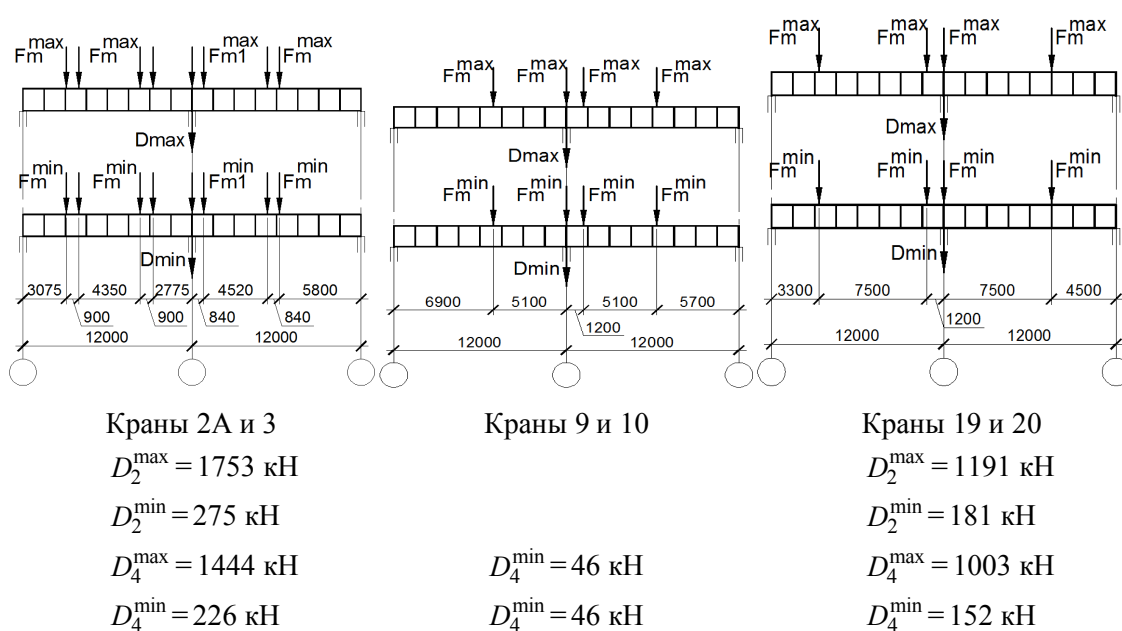


Рисунок 6 Вертикальные крановые нагрузки на колонну

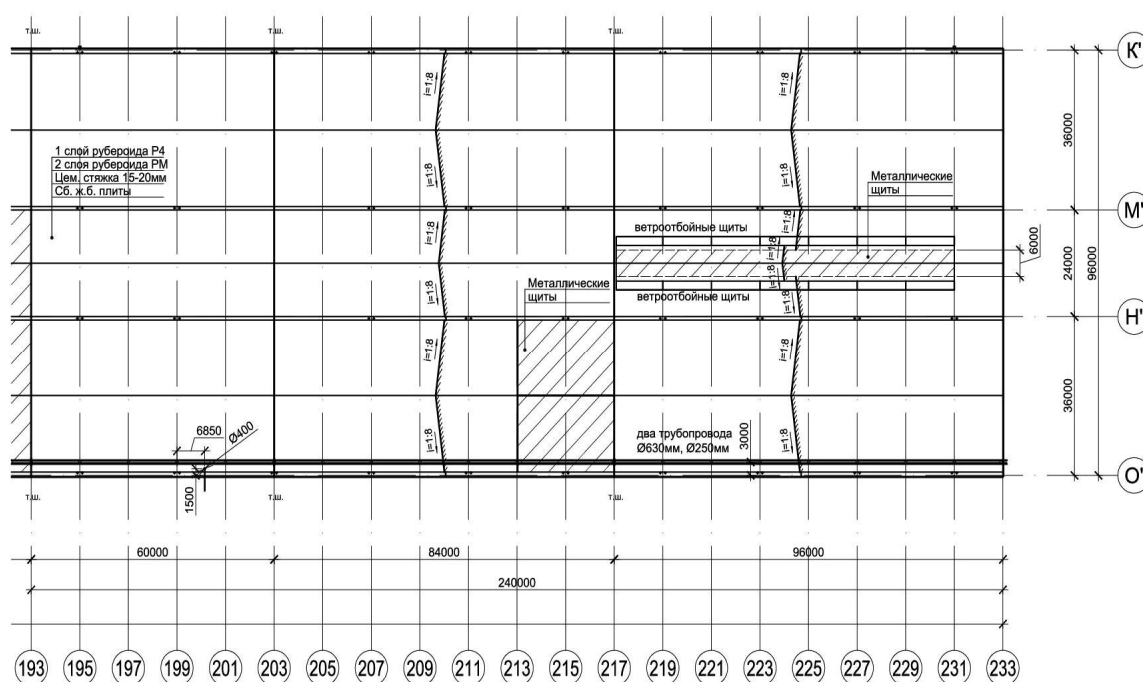


Рисунок 7 План кровли в осях 193–233

В осях 221–223 присутствует труба газопровода с принятыми диаметром 630 мм и толщиной стенки 8 мм, которая опирается на двутавровые балки 36 на расстоянии 1,0–2 м от оси 221, крепящиеся к стойкам стропильных ферм в уровне нижних поя-

сов с шагом 12 м. Сосредоточенная расчетная (коэф. 1,1) нагрузка от веса труб при длине участка 12 м составляет 20 кН.

На участках ремонта и обслуживания подвесного кранового оборудования принята полезная нагрузка: расчетное эксплуа-

тационное значение 4 кПа; расчетное предельное значение 4,8 кПа. Нагрузка принята только на специальных ремонтных площадках в местах подвесных кран-балок.

На покрытие здания принята нагрузка от производственной мокрой или слежавшейся пыли объемным весом 2 т/м^3 при максимальной толщине покрова 4 см в соответствии с Правилами технической эксплуатации производственных зданий и сооружений предприятий горно-металлургического комплекса Украины, утвержденными Министерством промышленной политики Украины в 2003 г. (г. Днепропетровск). Расчетное значение нагрузки от производственной пыли при коэффициенте надежности по нагрузке 1 составляет 0,784 кПа.

Назначение расчетных сочетаний нагрузок было принято с учётом определенных величин нагрузок и в соответствии с рекомендациями ДБН В.1.2–2:2006 [1].

Результаты расчета покрытия температурного блока в осях 203–217. Проверка проектных сечений элементов конструкций покрытия участка температурного блока в осях 203–217 пролета О–Н выполнялась в ЛИР-СТК, входящей в ПК ЛИРА.

Для всех элементов задавались марки или классы сталей согласно исходному проекту. Расчетные длины стержней задавались согласно нормам [3], при этом для верхних и нижних поясов ферм принимались расчетные длины стержней из плос-

кости ферм как расстояния между узлами, закрепленными от смещения из плоскости ферм. Подобными точками закрепления являются горизонтальные связи или узлы крепления жестких плит покрытия, прикрепленных к поясам ферм сварными швами или болтами.

В результате проверки проектных сечений были выявлены элементы конструкций покрытия, у которых превышен предел несущей способности. Результаты проверки стропильных и связевых ферм представлены на рисунке 8. На рисунке красным цветом выделены номера элементов, не прошедших проверку.

Максимальный процент исчерпания несущей способности подстропильной фермы ПФ19Г составляет 76 % в средних панелях верхнего пояса.

Подстропильная ферма ПФ18 не проверялась ввиду того, что после снятия части нагрузки на ферму от веса стенового фахверка проектного выезда, т. к. проем был заложен кладкой из шлакоблока, новые усилия меньше проектных.

Максимальный процент исчерпания несущей способности опорных стоек С1 (крестовые равнополочные уголки 90×8 ; $N = -130 \text{ кН РСН1}$) средних рядов колонн и С2 (сварной двутавр — пояса $2-200 \times 8$, стенка — 234×6 ; $N = -90 \text{ кН РСН1}$) крайних рядов колонн не более 35 %.

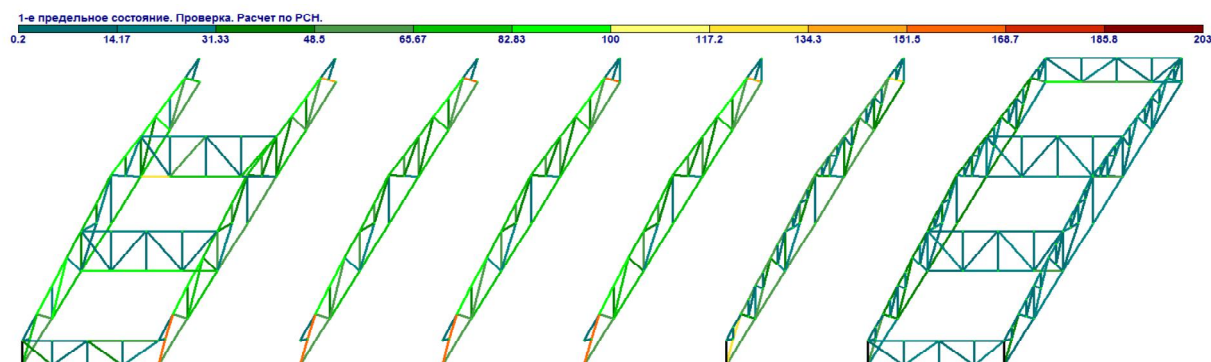


Рисунок 8 Результаты проверки Ф12, Ф16, Ф12у, Ф12Н, «Г»

В результате расчёта модели здания сортопрокатного цеха с учётом фактического технического состояния были сформулированы основные выводы и рекомендации по дальнейшей эксплуатации здания:

1. Во всех стропильных фермах марки Ф12 опорные раскосы (проектное тавровое сечение из двух равнополочных уголков 100×12) работают с превышением предела несущей способности. Необходимо усиление проектного сечения.

2. В торцевой ферме марки Ф16 по оси 233 средние раскосы (проектные тавровые сечения из равнополочных уголков 63×6 и неравнополочных уголков 110×70×8) на промежуточных опорах колонн фахверка работают с превышением предела несущей способности.

3. Опорные стойки ферм марки С1 (проектное крестовое сечение из равнополочных уголков 90×8) по среднему ряду колонн оси Н и С2 (проектное двутавровое сечение: пояса — 200×8, стенка — 234×6) по крайнему ряду колонн оси О работают с запасом по пределу несущей способности.

4. Подстропильные фермы марок ПФ18, ПФ19г, ПФ19д, ПФ19а работают с запасом по пределу несущей способности.

5. Пояса вертикальных связей покрытия марки «г» не прошли проверку из плоскости связи. Рекомендуется уменьшение расчетной длины пояса из плоскости путем установки дополнительных распорок типа «п» к узлам крестовых горизонтальных связей.

6. Горизонтальные связи по нижним поясам ферм работают с учетом исключения сжатых раскосов за счет соседних растянутых раскосов.

7. Коньковые горизонтальные крестовые связи по верхним поясам ферм исключаются из работы вследствие сжатия всех раскосов, не прошедших проверку по не-

сущей способности. С учетом горизонтального жесткого диска покрытия связи продолжают работу. В случае разрушения диска или его замены рекомендуется изменение геометрической схемы связи путем добавления распорок и раскосов.

8. В горизонтальных продольных связевых фермах по верхним поясам ферм присутствуют элементы, которые исключаются из работы как не прошедшие проверку по несущей способности. С учетом горизонтального жесткого диска покрытия связевые фермы продолжают работу. В случае разрушения диска из железобетонных плит или его замены на покрытие из металлических щитов по прогонам рекомендуется усиление поясов связевых ферм в осях 229–231 по оси Н и усиление поясов и раскосов связевых ферм в осях 207–209 по оси О.

Созданная расчётная схема позволила выполнить оценку напряжённо-деформированного состояния строительных конструкций здания сортопрокатного цеха с учётом фактического технического состояния после длительного периода эксплуатации без надлежащего обслуживания. На основе полученных результатов предложены мероприятия по приведению строительных конструкций здания сортопрокатного цеха в пригодное для нормальной эксплуатации техническое состояние.

Разработанная расчётная модель позволяет осуществлять мониторинг текущего состояния здания сортопрокатного цеха и выполнять прогнозирование его работы с учётом изменения технического состояния.

Предложенная методика направлена, прежде всего, на раннее выявление аварийного состояния строительных конструкций исследуемого объекта и предотвращение разрушения объектов, имеющих важное народно-хозяйственное значение для Луганской Народной Республики.

Библиографический список

1. ДБН В.1.2–2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. — Введ. 2007–01–01. — К. : Мінбуд України, 2006. — 60 с.

2. ПК ЛИРА, версия 9. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций [Текст] / Д. А. Городецкий и др. — К. : НИИАСС, 2002. — 147 с.

3. ДБН В.2.6-198:2014. Державні будівельні норми України. Сталеві конструкції. Норми проектування [Текст]. — Введ. 2015-01-01. — К. : Мінрегіон України, 2014. — 199 с.

© Псюк В. В.

© Антошина Т. В.

© Псюк М. Ю.

© Никишина И. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СА ЛГУ им. В. Даля Емец Е. В.,
к.т.н., доц., зав. каф. АДиСК ДонГТИ Бондарчуком В. В.*

Статья поступила в редакцию 29.11.2021.

PhD in Engineering Psiuk V. V. (LSU named after V. Dahl, Alchevsk, LPR, psuk@rambler.ru),
PhD in Engineering Antoshina T. V. (Alchevsk, LPR, tvantos@ukr.net), **Psiuk M. Yu.** (DonSTI,
Alchevsk, LPR, marikapt@rambler.ru), **Nikishina I. A.** (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR,
frezi9@ukr.net)

ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN STATE OF COATING STRUCTURES OF THE ROLL PRODUCTION ROLLING MILL OF BRANCH № 12 ZAO “VNESHTORGSERVIS”

The article presents the assessment results of the stress-strain state of coating structures of the roll production rolling mill, considering the actual technical condition after a long period of operation without proper maintenance. Based on the obtained results, measures are proposed to bring the building structures of the rolling mill into a technical condition suitable for normal operation.

Key words: load-bearing capacity, truss, vertical and lateral bracings, technical condition, monitoring of the current condition.

УДК 669.056.9:69.059.25

к.т.н. Будзило Е. Е.,
к.г.н. Горвая Н. А.

(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, ki1ri1ch@i.ua)

К ВОПРОСУ КАЧЕСТВЕННОГО ПРОВЕДЕНИЯ ОТДЕЛОЧНЫХ РАБОТ НА ПРИМЕРЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ ОКРАСКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ КОПРА ШАХТЫ им. С. ТЮЛЕНИНА ГУП ЛНР «УГЛЕРЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ»

Работа посвящена анализу качества подготовки поверхности при выполнении отделочных ремонтных работ по покраске металлоконструкций. Установлена связь между качеством подготовки поверхности и эксплуатационной надежностью покрытия. Предложена усовершенствованная конструкция радиальной щетки, позволяющая улучшить качество подготовительных работ.

Ключевые слова: ремонтные отделочные работы, подготовка поверхности, качество работ, радиальная щетка, дефекты окрасочного слоя.

При эксплуатации любых объектов с течением времени ухудшается их эксплуатационная надежность, что вызывает необходимость проведения различных ремонтных работ.

Покраска металлоконструкций является одним из наиболее распространенных видов ремонтных отделочных работ промышленных объектов, так как нарушение лакокрасочных покрытий приводит к коррозии конструкций и, соответственно, к неспособности элементов со временем воспринимать действующие усилия. От их качественного выполнения зависит не только надежная защита объектов, но и их внешний вид. Поэтому окрашивание металлических поверхностей должно проводиться с соблюдением всех технологических требований, к которым относятся тщательная подготовка основания, нанесение грунтовочных и окрасочных слоев [1].

Задача исследования — совершенствование существующих рекомендаций по выполнению подготовительных работ для окраски металлических поверхностей. Данные работы являются наиболее ответственным этапом проведения ремонтных отделочных работ по окраске, так как устранить возникшие дефекты после нанесения окрасочного слоя невозможно. Для исправления придется заново очищать поверхность и перекрашивать.

Объект исследования — копер ВОК шахты им. С. Тюленина ГУП ЛНР «Углереструктуризация».

Предмет исследования — металлоконструкции шахтного копра.

В результате обследования металлических конструкций копра, проводимого в соответствии с требованиями [2] при дневном освещении, температуре воздуха +18 °C и сухой погоде, были выявлены следующие дефекты:

- отслаивание лакокрасочного покрытия: самопроизвольное отделение некоторых участков от окрашиваемой поверхности (рис. 1);
- растрескивание лакокрасочного покрытия (образование разрывов) вследствие нанесения эмали на незачищенную поверхность;
- некачественно зачищенные участки конструкций (рис. 2);
- проявление ржавчины на лакокрасочном покрытии (рис. 3);
- элементы конструкций, на которых уже отсутствует лакокрасочное покрытие (рис. 4).

Обследование проводилось через год после выполнения ремонтных отделочных работ по окраске. В результате выявлено, что очистка поверхности была выполнена некачественно, о чем свидетельствует отслоение краски, наличие элементов конструкций без краски, проступившая ржавчина

и т. д. Связано это с тем, что очистка поверхности выполнялась металлическими щетками вручную при большом объеме ра-

бот. Эксплуатационный срок службы окрашенных поверхностей, который составляет в среднем 5 лет, не будет выдержан.



Рисунок 1 Отслаивание лакокрасочного покрытия



Рисунок 2 Незачищенные участки конструкций копра, по которым проводилось окрашивание



Рисунок 3 Проявление ржавчины на поверхности



Рисунок 4 Элементы конструкций, на которых уже отсутствует лакокрасочное покрытие

Вообще, существуют ручные и механизированные способы подготовки металлических поверхностей к окрашиванию.

Выбор того или иного способа подготовки поверхности предопределяется следующими факторами:

- требуемый уровень подготовки поверхности;
- вид лакокрасочного покрытия;
- состояние окрашиваемой поверхности (наличие ранее нанесенных покрытий);
- требуемая эксплуатационная долговечность покрытия;
- наличие механизмов, инструментов, приспособлений;
- квалификация рабочих, выполняющих ремонтные работы;
- доступность поверхностей;
- соответствие условиям безопасности труда и охраны окружающей среды;
- экономическая целесообразность.

Ручным способом (металлическими щетками) невозможно полностью очистить поверхность из-за неравномерного распределения ржавчины, что и подтвердили результаты проведенного обследования.

При механических способах, к которым относятся пескоструйный, гидроабразивный (гидропескоструйный), дробеструйный, дробеметный, очистка пламенем и т. д., можно добиться более качественного результата. Однако применение данных вариантов очистки поверхности при работе на высоте является нецелесообразным из-за громоздкости оборудования, что значительно усложняет проведение работ и увеличивает их стоимость. Их выполнение требует наличия высококвалифицированных специалистов.

В данном случае наиболее приемлемым является использование механизированного способа, при котором очистка поверхности выполняется с использованием вращающихся проволочных щеток, дисков, зачистных молотков с электро- или пневмоприводом, игольчатых пистолетов, шлифовальных кругов и т. д.

Конструкция вращающихся проволочных щеток, как наиболее часто используе-

мых для очистки поверхностей, представляет собой зажимающиеся между двумя дисками или закрепленные на цилиндрическом остоле ворсовые элементы [3].

С целью повышения эксплуатационной надежности и долговечности инструмента, а также для выполнения более качественной очистки поверхности нами была разработана радиальная щетка цилиндрической формы [4] с U-образными пучками ворсовых элементов (см. рис. 5) и кольцевой камерой для пластичного смазочного материала. Щетка состоит из направляющей втулки 1 и сопряженных с ней прижимных фланцев (верхний — 2, нижний — 3). Для образования гнезд под установку ворсовых элементов 4 коаксиально к фланцам устанавливаются волнообразные кольца 5 и 6. При этом выступ одного кольца располагают под впадиной другого. Прижимные фланцы 2 и 3 с втулкой 1 образуют кольцевую камеру 7, которая заполняется пластичным смазочным материалом. Кольцевая камера по периферии и свободные по длине концы ворсовых элементов покрыты защитной оболочкой с содержанием кремниевой пыли 8. Включение кремниевой пыли позволяет улучшить качество обрабатываемой поверхности. В верхнем прижимном фланце имеется отверстие для заполнения кольцевой камеры пластичным смазочным материалом, которое закрывается пробкой 9.

Перед началом работы пресс-шприцем через масленку в кольцевую камеру нагнетается пластичный смазочный материал. Незначительный его объем и большая скорость вращения щетки не позволяют замаслить обрабатываемую поверхность. По мере нагрева щетки от трения ворсовых элементов по обрабатываемой поверхности тепло передается на кольцевую камеру и пластичный смазочный материал нагревается. В результате вследствие центробежных сил пластичный материал нагнетается в зазоры между проволочками ворсовых элементов. Это обеспечивает периодическое нанесение пленки на по-

верхность проволочек внутри ворсовых элементов и защищает их от коррозии. Изгиб ворсовых элементов во время контакта с обрабатываемой поверхностью вызывает взаимное смещение проволочек. Наличие полусухого и жидкого трения между проволочками снижает истирание поверхностей, что значительно повышает долговечность инструмента. Цилиндрическая форма щетки и незначительный ее вес (0,6–0,8 кг — в зависимости от диаметра втулки) позволяет легко зачищать различные элементы металлических конструкций (стойки, укосины и т. д.).

Для облегчения работы по зачистке полков уголков нами предлагается усовершен-

ствованная конструкция радиальной щетки цилиндрической формы с U-образными пучками ворсовых элементов. В данной щетке увеличена длина ворсовых элементов на 30–40 мм, что позволяет с меньшим усилием производить работы по подготовке поверхностей к окраске стыков полков уголков — одного из основных элементов шахтных копров. Для предотвращения повреждения ворсовых элементов их необходимо зафиксировать в области остова хомутным соединением при помощи заклепок или болтов на длину увеличения. Именно увеличение размера ворсовых элементов позволит выполнять работы с меньшим усилием и в труднодоступных местах.

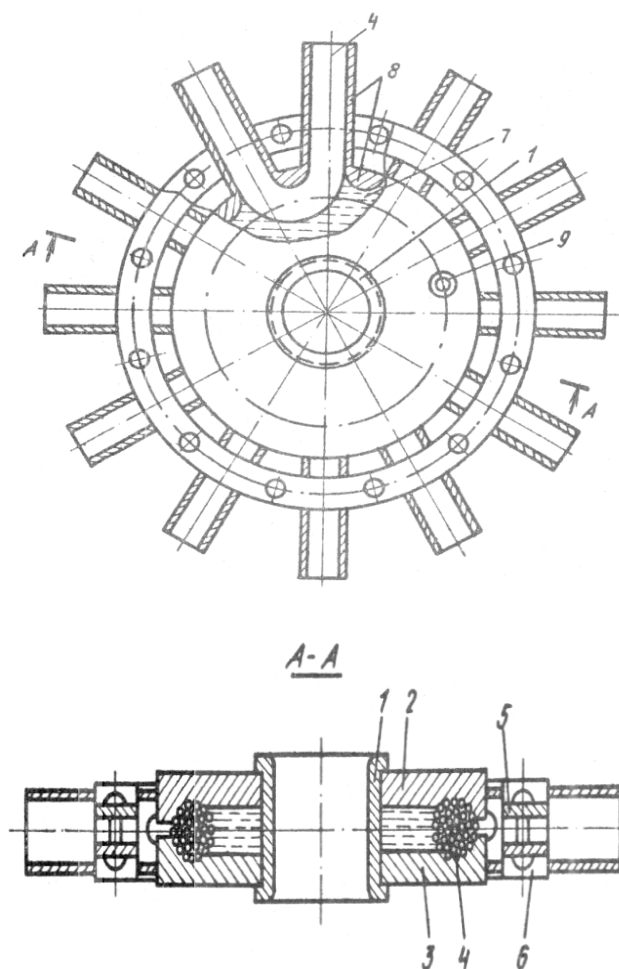


Рисунок 5 Схема радиальной щетки цилиндрической формы с U-образными пучками ворсовых элементов и кольцевой камерой для пластичного смазочного материала

Выводы:

1. Выявлены дефекты, которые возникают в результате некачественной подготовки поверхности к окрашиванию.

2. Проведен анализ различных способов очистки поверхности при выполнении ремонтных отделочных работ. При больших объемах работ наиболее целесообразным является применение механизированных инструментов.

3. Даны рекомендации по использованию для более качественной подготовки поверхности к окрашиванию разработанной нами радиальной щетки цилиндрической формы с U-образными пучками ворсовых элементов. Наличие кольцевой камеры для пластичного смазочного материала между прижимными фланцами значительно повышает срок эксплуатации инструмента. Включение кремниевой пыли на ворсовых элементах позволяет улучшить качество обрабатываемой поверхности.

4. Предложена усовершенствованная конструкция радиальной щетки цилиндрической формы с U-образными пучками ворсовых элементов для улучшения очистки труднодоступных участков.

Библиографический список

1. ГОСТ 9.402–2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию [Текст]. — Введ. 2006-01-01. — М.: Стандартинформ, 2006. — 43 с.
2. ГОСТ 9.407–2015. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида [Текст]. — Введ. 2016-01-03. — М.: Стандартинформ, 2015. — 43 с.
3. Механические методы подготовки поверхности [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://pereosnastka.ru/articles/mekhanicheskie-metody-podgotovki-poverkhnosti>.
4. А. с. 927224 СССР, МПК А 46 В 3/16. Щетка / Мозговой Г. И. Емец В. С. Будзило Е. Е. — № 4186525/31-12 ; заявл. 26.01.87 ; опубли. 30.07.88, Бюл. 28. — 3 с.

© Будзило Е. Е.

© Горовая Н. А.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СиА ЛГУ им. В. Даля Николаевой Е. К., к.т.н., доц. каф. ИМиС ДонГТИ Балашиовой О. С.

Статья поступила в редакцию 24.11.21.

PhD in Engineering Budzilo E. E., PhD in Engineering Gorovaia N. A. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, kilri1ch@i.ua)

THE QUESTION OF QUALITATIVE FINISHING WORK ON THE EXAMPLE OF SURVEYING THE PAINTING OF METAL STRUCTURES OF PITHEAD OF MINE NAMED AFTER S. TYULENIN SUE LPR “UGLERESTRUKTURIZATIA”

The paper is dedicated to analyzing the quality of surface preparation at performing finishing remedial work on painting metal structures. The connection between the quality of surface preparation and serviceability of coating is determined. An improved design of the radial brush is proposed, which allows to improve the quality of preparatory work.

Key words: remedial finishing works, surface preparation, quality of work, radial brush, defects of the paint layer.

УДК 725.4.004.68:692.415

к.т.н. Гречишкина Е. В.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, *e.valerievna@mail.ru*),
к.т.н. Псюк В. В.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, *psuk@rambler.ru*)

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА МОНТАЖНО-ДЕМОНТАЖНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЗАМЕНЕ ПОКРЫТИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ

Выполнено исследование условий реконструкции промышленных зданий. Выявлены группы факторов, оказывающих влияние на демонтаж и монтаж покрытий зданий. Установлена частота проявления факторов, выявленных на реконструируемых объектах металлургической отрасли.

Ключевые слова: реконструкция, замена покрытий, монтажно-демонтажные процессы, условия стесненности, факторы, производственные условия, конструкции покрытий.

Конструкциями, наиболее подверженными агрессивному воздействию и физическому износу в цехах промышленных предприятий с вредным производством, являются покрытия. Основной причиной ускоренного физического износа конструктивных элементов покрытий является их интенсивное коррозионное разрушение, обусловленное мощным воздействием высоких температур (150–300 °С), агрессивной воздушно-газовой среды и конденсата, вибрационных и динамических нагрузок. Еще в более неблагоприятных условиях эксплуатируются плиты покрытий, подвергающиеся одновременно воздействию как указанных нагрузок, так и внешних атмосферных и техногенных (отложение производственной пыли на поверхности) факторов.

Как свидетельствует опыт [3], замена покрытий является ведущим и наиболее распространенным процессом комплексной реконструкции металлургических заводов. Замена покрытий, их демонтаж и монтаж являются одними из наиболее трудоемких процессов, выполняемых при реконструкции промышленных предприятий, так как осуществляются под воздействием ряда факторов, присущих действующему производству. По трудоемкости монтаж и демонтаж конструкций покрытий относительно общих трудозатрат на реконструкцию цеха составляет 43–55 %.

В связи с этим **целью** данной работы является исследование влияния условий реконструкции на производство монтажно-демонтажных процессов при замене конструкций покрытий промышленных зданий.

Объект исследования — реконструкция промышленных зданий.

Предмет исследования — монтажно-демонтажные процессы при замене покрытий.

Задачей настоящего исследования является определение характера влияния условий реконструкции производственного здания сортопрокатного цеха на выполнение демонтажа и монтажа плит покрытия.

Методика исследований — анализ литературных и нормативных источников, обработка результатов натурных, экспериментальных и аналитических исследований.

Для решения поставленной задачи были выполнены анализ, обобщение опыта и результатов обследования объектов реконструкции зданий металлургической отрасли.

В качестве объекта исследования принято здание сортопрокатного цеха Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис», обследование которого было выполнено сотрудниками Донбасского государственного технического университета в августе — сентябре 2019 года.

При обследовании объекта определялись: архитектурно-строительные характеристики реконструируемых зданий; коли-

чество заменяемых участков покрытия, их периметры и площади; масса демонтируемых и монтируемых конструкций; занятые и требуемые площади вне реконструируемых пролетов; расстояния от действующих транспортных путей до объектов реконструкции; наличие и длина тупиковых дорог; площади, занятые технологическим оборудованием внутри цеха; наличие действующих сетей железных дорог и занятая ими площадь; монтажные машины и механизмы, использованные при замене покрытий, их количество и грузоподъемность; продолжительность и трудоемкость выполненных монтажно-демонтажных работ [6].

Для получения первичной информации были использованы рабочие чертежи, разработанные ППР и ПОС на реконструкцию, технологические карты демонтажных и монтажных процессов, а также фактические технико-экономические показатели и исполнительная документация по объекту реконструкции.

По результатам выполненных исследований выделены три группы основных факторов [5], оказывающих влияние на технологические процессы монтажа и демонтажа покрытий при реконструкции зданий металлургических заводов (рис. 1).

Первая группа факторов учитывает архитектурно-строительные параметры (АСП): особенности генерального плана предприятия и его развития, определяющие сложность производства работ в условиях сложившейся застройки территории предприятия; объемно-планировочные параметры реконструируемого здания, обуславливающие размеры фронта работ; параметры конструкций покрытия, от которых зависит метод их демонтажа и монтажа.

Достаточно высокая плотность застройки территории, являющаяся характерной особенностью металлургических заводов [3, 4], затрудняет установку монтажных кранов вблизи реконструируемых участков, что

вынуждает грузоподъемные механизмы работать на максимальных вылетах. Стесненность строительной площадки обуславливает нетрадиционную организацию внутриплощадочных транспортных потоков, что затрудняет передвижение строительной техники, рабочих, управление строительными машинами и механизмами. Увеличение производственных площадей, сети автомобильных и железных дорог в пределах существующей территории предприятия вызвало сужение проездов, проходов и удаленность транспортных путей от монтажной зоны. Это создает трудности в перемещении строительных машин и усложняет транспортные схемы доставки конструкций в зону монтажа [2].

Рассредоточенность реконструируемых участков, характерная для практики замены покрытий, приводит к частой перестановке механизмов, нарушению ритмичности и непрерывности демонтажных и монтажных процессов.

Разнообразие и сложность объемно-планировочных и конструктивных параметров реконструируемого производственного здания сортопрокатного цеха, а также различная конфигурация участков заменяемого покрытия обуславливают необходимость применения специальных технологий и средств механизации, наиболее оптимальных в данных условиях.

Разнотипность демонтируемых и монтируемых конструкций покрытия по массе вызывает увеличение количества переоснасток кранов, нарушает ритмичность и непрерывность монтажно-демонтажного процесса. Мелкоразмерность элементов покрытия приводит к снижению производительности работ и показателей использования кранов по грузоподъемности. Необходимость выполнения работ по демонтажу конструкций увеличивает затраты ручного труда за счет разборки швов и узлов крепления.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

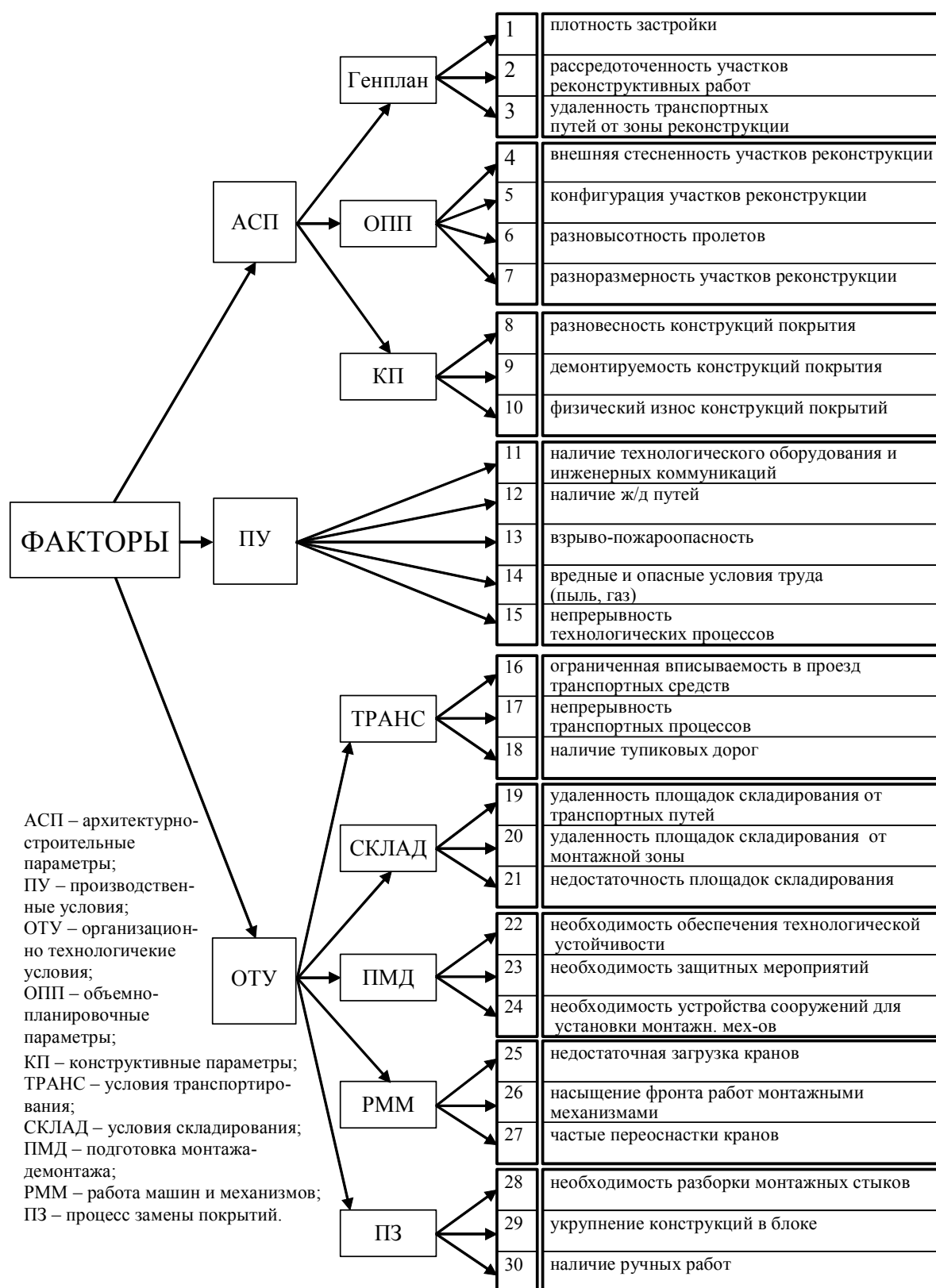


Рисунок 1 Факторы, влияющие на процесс замены покрытий

Достаточно большой вес демонируемых конструкций покрытия здания сортопрокатного цеха (нагрузка 1 м^2 покрытия с железобетонными плитами составляет 1,864–1,924 кПа) затрудняет выбор монтажных машин и механизмов, а также технологического решения демонтажа-монтажа в целом. Соотношение объемов монтажных и демонтажных работ оказывает влияние на производительность монтажного потока.

Техническое состояние конструкций покрытия здания цеха, высокая степень их физического износа, являющиеся следствием длительной эксплуатации, требуют в отдельных случаях проведения ряда дополнительных работ (рис. 2) [6].

Усиление и восстановление конструкций покрытия, необходимые с целью избегания обрушения при демонтаже, требуют дополнительных затрат труда, материалов и техники.

Вторая группа факторов учитывает специфические особенности производственных условий (ПУ) реконструкции цехов металлургических заводов.

Насыщенность зоны реконструкции действующим технологическим оборудованием и инженерными коммуникациями затрудняет применение имеющихся средств механизации и усложняет организацию материально-технического снабжения, а также вынуждает проводить дополнительные работы по предохранению технологического оборудования от повреждений (рис. 3).

Стесненность рабочей зоны, вызванная наличием сети действующих железных дорог вблизи здания сортопрокатного цеха, приводит к резкому снижению эксплуатационной производительности машин и механизмов, что способствует увеличению объемов немеханизированных работ [6].

Повышенная опасность в зоне проведения монтажно-демонтажных работ (взрыво-, пожароопасность, опасность обрушения, опасность от работы основного технологического оборудования) не только снижает производительность труда рабочих, но и ограничивает применение прогрессивных способов ведения работ. При этом снижается уровень механизации и запрещается ведение сварочных работ.



Рисунок 2 Отсутствие защитного слоя бетона на плитах покрытия, коррозионное поражение оголенной арматуры. Глубина повреждения бетона до 40 %



Рисунок 3 Технологические трубопроводы, расположенные на покрытии здания сортопрокатного цеха

Вредные условия труда, к которым относятся загазованность, высокая концентрация пыли в воздухе, вибрации, тепловыделения и шум, присущи многим цехам металлургических заводов. В таких условиях увеличивается трудоемкость и продолжительность работ, появляются дополнительные издержки в результате внедрения мероприятий по технике безопасности и обеспечению нормальных условий труда [4].

Непрерывность технологических процессов является характерной чертой металлургического производства. Это обуславливает режим и последовательность монтажа и демонтажа конструкций покрытий. Поэтапная передача участков для производства монтажно-демонтажных работ вызывает увеличение непроизводительных затрат на передислокацию бригад и строительной техники.

Третья группа факторов представляет особенности организационно-технологических условий (ОТУ) при реконструкции металлургических предприятий: транспортирования; складирования; работы машин и механизмов; подготовки монтажно-демонтажного процесса; собственно, процесса замены покрытий.

Обследование объекта реконструкции — производственного здания сортопрокатного цеха — показывает, что недостаточность радиусов поворота автомобильных дорог для вписывания транспортных средств является одним из основных ограничений при организации транспортного процесса.

Временные дороги, в большинстве случаев, как показывает анализ проведенных реконструкций ряда объектов металлургической отрасли, запроектированы по частично или полностью тупиковой схеме. В результате этого возникают потери, связанные с простоем транспортных средств.

Пересечение маршрутов транспортирования конструкций покрытия с действующими автомобильными и железными дорогами тяжелого и круглогодичного режима эксплуатации на территории, ведущей к сортопрокатному цеху, требует устройства и содержания охраняемых переездов. Это нарушает непрерывность транспортных процессов и приводит к увеличению продолжительности транспортного цикла.

Недостаточность площадей для складирования конструкций покрытия, как монтируемых, так и демонтированных, обуславливает необходимость создания пло-

щадок складирования вне зоны действия монтажных кранов или на достаточном удалении от транспортных путей. Это приводит не только к увеличению затрат времени и труда на дополнительные погрузочно-разгрузочные работы, но и требует разработки вопросов доставки конструкций покрытия в монтажную зону.

Для обеспечения несущей способности и монтажной устойчивости при использовании крышевых грузоподъемных механизмов требуется временное усиление стропильных конструкций. При усилении конструкций возникает необходимость предварительного обследования стропильных ферм, разработки проекта усиления, выполнения дополнительных и трудоемких работ.

Защита технологического оборудования и систем инженерных коммуникаций, находящихся в здании цеха, от возможных повреждений при производстве монтажных и демонтажных процессов требует выполнения ряда подготовительных мероприятий. Сложные и материалоемкие решения по защите оборудования повышают материальные затраты и увеличивают общую трудоемкость работ.

Ограничение свободы маневрирования при работе монтажных кранов потребует выполнения дополнительных машинных операций и приведет к снижению эффективности их использования. Поэтому в особо стесненных условиях заводской террито-

рии возможно возвести специальные сооружения и эстакады. Но это, в свою очередь, повлечёт расход материалов и времени.

Недостаточная загрузка монтажных кранов, возникающая при демонтаже и монтаже конструкций малой массы, обуславливает непроизводительное использование монтажных механизмов. Насыщение фронта работ одновременно несколькими монтажными кранами с ограниченной рабочей зоной приводит к увеличению количественного состава и удельной грузоподъемности комплектов механизмов, а также создает высокую интенсивность монтажных работ.

Частые переоснастки монтажных кранов, осуществляемые вследствие различной массы отдельных конструкций и мест их установки, вызывают дополнительные перерывы, нарушают ритмичность и непрерывность монтажно-демонтажных процессов.

Необходимость разрушения стыков при демонтаже конструкций покрытия повышает общую трудоемкость работ и снижает эффективность использования монтажных механизмов во времени.

Работы по разборке кровли выполняются по технологии, отличной от демонтажа и монтажа конструкций, и характеризуются высокими затратами ручного труда.

На основании выполненных исследований установлена частота проявления факторов, выявленных на реконструируемых объектах металлургической отрасли (рис. 4).

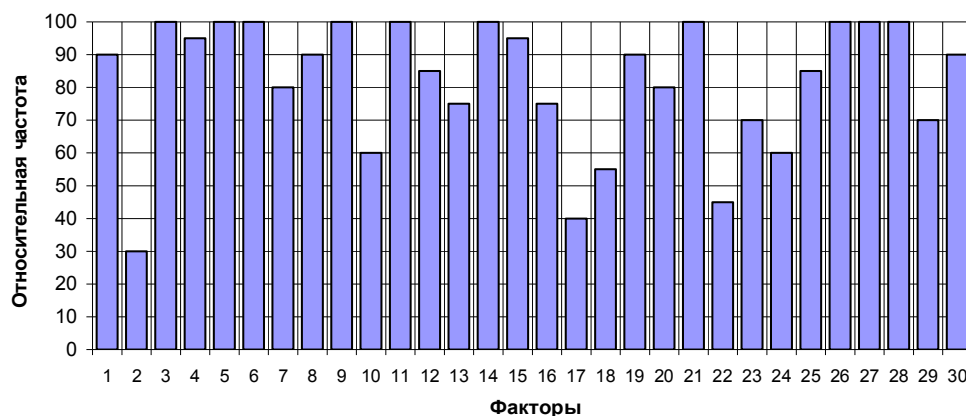


Рисунок 4 Частота проявления исследуемых факторов на реконструируемых объектах металлургической отрасли

Вышеизложенное позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Сложность, специфичность и разнообразие условий, возникающих при реконструкции цехов металлургической отрасли, создают трудности при выполнении замены покрытий, что, как правило, приводит к снижению производительности труда, строительной техники и транспортных средств, а также повышению трудоемкости и продолжительности работ.

2. Выявлены основные факторы, влияющие на монтажно-демонтажный процесс, и классифицированы на группы: архитектурно-строительных параметров реконструируемого объекта, характера технологических режимов и условий производства, вида и характера организационно-технологических ограничений при выполнении реконструкции.

3. Замена железобетонных плит покрытия производственного здания сортопрокатного цеха на более лёгкие конструкции — стальные щиты — позволит снизить нагрузку от покрытия более чем в два раза с 1,864–1,924 кПа (нагрузка 1 м² покрытия с железобетонными плитами) до 0,72–0,856 кПа (нагрузка 1 м² покрытия со стальными щитами) и обеспечит дальнейшую безопасную эксплуатацию здания.

К направлению дальнейших исследований относится исследование возможных методов технологии и организации монтажно-монтажного процесса замены железобетонных плит покрытия на стальные щиты и создание математической модели оценки факторов, влияющих на выбор наиболее рационального технологического решения по замене конструкций покрытий.

Библиографический список

1. ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Текст]. — Введ. 2014–01–01. — М. : Стандартинформ, 2014. — 60 с.
2. Бадьин, Г. М. Современные технологии строительства и реконструкции зданий [Текст] / Г. М. Бадьин, С. А. Сычев. — М. : БХВ-Петербург, 2013. — 20 с.
3. Левченко, В. Н. Техническое перевооружение и реконструкция промышленных зданий [Текст] / В. Н. Левченко, В. В. Кардаков. — Макеевка : Макеевский инж.-строит. ин-т., 1999. — 60 с.
4. Давыдов, В. А. Монтаж конструкций реконструируемых промышленных предприятий [Текст] / В. А. Давыдов, А. Я. Конторчик, В. А. Шевченко. — М. : Стройиздат, 1997. — 208 с.
5. Гречишкина, Е. В. Формирование и комплексная оценка технологических решений при производстве монтажно-демонтажных процессов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08 / Елена Валериевна Гречишкина. — К. : КНУБА, 2002. — 21 с.
6. Отчёт № 221/2019-1 (1 этап) по результатам обследования и оценки технического состояния строительных конструкций производственного здания сортопрокатного цеха в осях 193–233 пролёта О–Н с отм. +16,250 м до отм. +20,850 м филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» [Текст]. В 3-х томах. Том 1. Общая часть. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — 201 с.

© Гречишкина Е. В.

© Псюк В. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СиА ЛГУ им. В. Даля Горовой Н. А.,
к.т.н., доц., зав. каф. АДиСК ДонГТИ Бондарчуком В. В.

Статья поступила в редакцию 10.12.2021.

PhD in Engineering Grechishkina E. V. (LSU named after V. Dahl, Alchevsk, LPR, e.valerievna@mail.ru), **PhD in Engineering Psiuk V. V.** (LSU named after V. Dahl, Alchevsk, LPR, psuk@rambler.ru)

IDENTIFICATION OF THE MAIN FACTORS AFFECTING THE ASSEMBLING AND DISMANTLING PROCESSES AT REPLACING COATINGS OF INDUSTRIAL BUILDINGS

Studying the conditions for reconstruction the industrial buildings was carried out. Groups of factors influencing the dismantling and assembling of building coverings have been identified. The frequency of factors manifestation identified at the reconstructed objects of metallurgical industry has been revealed.

Key words: reconstruction, replacement of coatings, assembling and dismantling processes, lack of space conditions, factors, production conditions, coating constructions.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**MECHANICAL ENGINEERING
AND MACHINE SCIENCE**

УДК 536.46+662.611/612

*д.т.н. Харламов Ю. А.,
к.т.н. Петров П. А.,
к.т.н. Козачишен В. А.,
к.т.н. Изюмов Ю. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

**ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА:
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ.
СООБЩЕНИЕ 1. ГАЗОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ
В ДВИГАТЕЛЯХ И ЭНЕРГЕТИКЕ**

Кратко рассмотрены сущность, преимущества и недостатки детонационного сгорания газов, его энергетическая эффективность и перспективные направления использования. В Сообщении 1 систематизированы данные о практическом использовании явления газовой детонации для совершенствования и разработки новых типов двигателей внутреннего сгорания, а также в энергетике при создании энергосберегающих горелочных устройств, производства электроэнергии и очистки поверхностей нагрева агрегатов, сжигающих различные виды жидкого и твердого топлива.

Ключевые слова: взрывные технологии, детонационно-газовые устройства, энергетическое оборудование, горелочные устройства, дефлаграция, детонационная волна, детонация стационарная, ротационная, нестационарная, пульсирующая.

Введение. Взрывные технологии находят все более широкое применение в мирных целях, например, в добывающих отраслях промышленности, в машиностроении для сварки, упрочнения и др. Применение взрывных технологий позволяет в короткие сроки с приемлемыми затратами решать многие технологические проблемы, в том числе возникающие при создании новой техники. Для реализации взрывных технологий используются заряды твердых взрывчатых веществ (ВВ) и изделия из них (например, удлиненные кумулятивные заряды, кумулятивные перфораторы), системы их инициирования, системы контроля безопасности и т. п. Вместе с объектами воздействия (свариваемыми пластинами, упрочняемыми деталями, заготовками для штамповки и др.), специальной оснасткой (матрицами для штамповки, контейнерами для сохранения готового изделия, основаниями и опорами) заряды ВВ и системы их инициирования образуют технологическое взрывное устройство. Очень часто технологические взрывные устройства распола-

гаются в специальных защитных взрывостойких камерах (взрывных камерах), являющихся по сути промышленными взрывными установками. Тем не менее широкое применение твердых ВВ ограничено, прежде всего, по требованиям безопасности. Поэтому всё возрастающее внимание вызывает использование более безопасного и удобного источника энергии в виде газовой детонации (ГД) [1]. Уровень давлений, температур и скоростей, развиваемых за детонационными или близкими к ним по интенсивности ударными волнами в газах, а также импульсный характер воздействия указанных факторов определяют большие потенциальные возможности их технического и технологического использования.

Детонационный режим горения отличается от обычного (дефлаграционного) более быстрым выделением энергии, более высокими температурами и давлением продуктов сгорания. Термодинамически детонация — самый эффективный способ прямого сжигания горючего [1]. Этим объясняется

развитие научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по использованию управляемой детонации в энергетических установках, технологических горелках, других устройствах и технологиях. При успешном решении проблемы циклической детонации воздушных смесей обычных топлив (природный или попутный газ, угольные частицы, мазут и др.) ожидается значительная экономия горючего вследствие более высокой термодинамической эффективности детонационного горения и низкого выхода вредных веществ (ввиду очень малой продолжительности детонационного цикла). После длительных фундаментальных исследований (более чем 100 лет) расширяется опыт практического использования явления ГД в промышленности, науке и технике. Первые результаты практического применения ГД описаны в работе [2], однако за истекшее время детонационно-газовые технологии получили дальнейшее развитие.

Расширение областей применения ГД приводит к необходимости более детальной разработки конструкций детонационно-газовых устройств (ДГУ) и технологий для решения большого круга специфических задач. Проведенные к настоящему времени экспериментальные и теоретические исследования рабочих процессов и НИОКР по созданию новых ДГУ представляют большую научную и практическую ценность, однако носят разрозненный характер, что сдерживает поиск новых областей применения ГД, их детальную разработку и оценку их эффективности.

Целью данной статьи является анализ и систематизация практических применений газовой детонации и основных направлений НИОКР по ее практическому использованию, опыта ее применения в основных отраслях экономики, науки и техники, а также анализ перспектив дальнейшего развития.

Детонационное горение газов в каналах (газовая детонация (ГД)). Детонационная волна (ДВ) в газовой смеси представляет собой многофронтный газодина-

мический комплекс [1, 2]. Движение поперечных волн в стационарно распространяющейся ДВ носит квазипериодический характер, а их траектории образуют упорядоченную структуру с характерным поперечным масштабом — размером ячейки a . Размер ячейки характеризует минимальные размеры канала для распространения детонации, критическую энергию инициирования детонации, условия возбуждения детонационного режима сгорания смеси и пр. В теории газовой детонации для расчета осредненных характеристик процесса широко используются идеализированные классические представления о ДВ.

Идеальная детонационная волна в газовых смесях представляет собой комплекс из ударной волны (УВ) и примыкающей к ней волны горения. Воспламенение смеси и основное тепловыделение происходят, как правило, в адиабатических условиях, хотя формирование волны в целом идет за счет процессов переноса. Непосредственно к УВ примыкает зона индукции — область изотермической цепной реакции с приблизительно постоянными значениями температуры T и давления p (пик Неймана) [1]. Здесь температура и плотность ρ в несколько раз, а давление — в десятки раз превышают значения перед УВ. За зоной индукции следует зона основного тепловыделения, в которой температура повышается с $1500 \div 2000$ до $3000 \div 4500$ К, давление уменьшается вдвое, а плотность снижается до величины $(1,7 \div 1,9) \rho_0$ (где ρ_0 — начальная плотность).

За зоной основного тепловыделения следует квазиравновесное течение продуктов детонации (ПД). Идеальной детонацией Чепмена — Жуге (СЖ) называется детонация с мгновенными реакциями и условиями на звуковой поверхности: химическая равновесность ПД и $u = a_e$, где u — скорость газа и a_e — равновесная скорость звука. Скорость детонации D , температура и отнесенные к начальным значениям давление и плотность ПД слабо зависят от начальной температуры смеси и изменения

начальной плотности на два-три порядка, а размер ячейки приблизительно обратно пропорционален начальному давлению и чувствителен к неидеальности газа.

Детонационные волны при $D > D_{CL}$ и $p > p_{CL}$ называются пересжатыми. Они возбуждаются под воздействием волн сжатия, догоняющих фронт, и без их «поддержки» быстро замедляются. Даже небольшое пересжатие волны (по скорости детонации) приводит к резкому увеличению давления, плотности и массовой скорости газа [1], а в реальной многофронтной ДВ — к резкому уменьшению размера ячейки. При значительном пересжатии из-за процессов диссоциации реакция становится эндотермической, вследствие чего фронт УВ становится устойчивым, а ячеистая структура исчезает.

При уменьшении диаметра трубы из-за больших теплотерь и при некотором предельном диаметре звуковая скорость газа становится не достижимой ни при каких значениях D . Количественно этот диаметр близок к предельному диаметру реальной детонации, который приблизительно на порядок меньше размера ячейки многофронтной детонации [1]. Дефицит скорости предельной детонации зависит от состава смеси и может равняться 10÷30 %. Вблизи пределов влияние затухания турбулентности и влияние теплотерь сравниваются, и численные модели, учитывающие оба фактора и только взаимодействие ПД со стенками канала, дают приблизительно одинаковые результаты.

С помощью предположения об экспоненциальной зависимости скорости химического тепловыделения от температуры и условия роста температуры за УВ академиком Я. Б. Зельдовичем [1] получено ограничение на мощность теплоотвода и дана оценка длины зоны реакции, экспоненциально зависящей от температуры непосредственно за фронтом УВ. Была установлена двузначная подковообразная зависимость скорости детонации от диаметра трубы, и близко к реальности оценен дефицит скорости детонации. Однако

влияние трения и влияние теплоотвода на градиент температуры газа за УВ противоположны по знаку, причем температура за УВ под совместным воздействием трения и теплоотвода всегда растет. Тем не менее модель [1] дает правильные результаты.

Потери энергии на трение и теплоотвод зависят от формы канала и шероховатости его стенок. Следует различать шероховатость стенки и систему отдельных препятствий, соизмеримых с размером ячейки многофронтной детонации. Последние, благодаря турбулизации потока и локальному повышению температуры в отраженных волнах, могут не препятствовать, а, наоборот, способствовать распространению детонации. Любая смесь с экзотермической реакцией способна детонировать в каналах достаточно большого размера (принцип Харитона) при достаточно большой энергии инициирования.

Особенности горения газов и распылов топлива в детонационном режиме определяют возможность его использования для многих практических применений. Устройства, использующие газовую детонацию, могут быть как импульсными, так и непрерывного действия.

Термодинамически детонация — самый эффективный способ прямого сжигания горючего. Именно поэтому в настоящее время активно разворачиваются научные исследования, направленные на применение в энергетических установках управляемой детонации [2].

Согласно расчету по классической теории Жуге, при детонационном сгорании плотность продуктов в 2 раза превышает плотность начальной смеси, давление в 2 раза больше давления, развиваемого при взрыве в замкнутом объеме, температура на 10÷20 % превышает температуру при взрыве в замкнутом объеме, скорость потока продуктов сгорания составляет до половины скорости детонационной волны, что означает, что 17 % всей энергии смеси переходит в кинетическую энергию. Расчетное значение КПД детонационного сгорания

превышает КПД горения при постоянном объеме на 13 % [1]. Абсолютное преимущество детонации Чепмена — Жуге проявляется только при использовании кинетической энергии продуктов детонации.

Проблемы пульсирующей детонации интенсивно изучаются и широко обсуждаются в научной литературе. Установлено, что идеализированная схема процессов в камерах сгорания, положенная в основу расчетов, сильно отличается от реальности. В основу расчетов закладывается представление о том, что в камере возникает стационарная детонация (режим Чепмена — Жуге). В реальности после поджига смеси переход горения в детонацию происходит на значительном расстоянии. Полученная в экспериментах скорость образовавшейся детонационной волны не сразу достигает значений скорости стационарной детонации Чепмена — Жуге. Смешение вводимых топлива и окислителя происходит не мгновенно, необходимо принятие специальных мер для уменьшения пути смешения.

Ниже рассмотрены основные разработки по практическому использованию газовой детонации в промышленности и обслуживающих отраслях экономики.

Применение ГД в двигателях внутреннего сгорания. Детонация недопустима в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Поиски средств борьбы с детонацией — предмет неустанных исследований учёных и инженеров разных специальностей. Вследствие детонации падает мощность двигателя, повышается удельный расход топлива, резко понижается надёжность двигателя вследствие быстрого износа и разрушения ответственных деталей (клапанов, поршней, колец). Известны попытки создания гибридного детонационно-поршневого двигателя, в котором вместо выхлопных труб установлены детонационные трубы, создающие реактивную тягу [3].

Совершенствование современных авиационных двигателей и энергетических ма-

шин традиционных схем подошло к своему технологическому пределу. Тяга воздушно-реактивного двигателя выше, чем выше давление в камере сгорания и температура соответственно. Давление в камере сгорания можно увеличить, подняв температуру горения, а также подавая окислитель под возможно большим давлением. Это ведет к необходимости использования все более дорогостоящих жаростойких материалов, а также к увеличению массы и стоимости компрессоров. Другой способ увеличения давления в камере сгорания — увеличение скорости сгорания смеси. По своей термодинамической эффективности наиболее привлекательным режимом быстрого горения является детонация.

Импульсный детонационный двигатель (Pulsing Detonating Engine — PDE — в международной терминологии) является наиболее интересным примером импульсного детонационного устройства [4]. Простейшим примером PDE может служить детонационная труба с открытым концом. На закрытом конце устанавливаются инжекторы для подачи горючего и окислителя. После заполнения трубы смесью детонация может быть инициирована в двух различных положениях: на закрытом или открытом конце. В любом случае давление продуктов детонации на закрытый конец трубы производит тягу. Скорость детонационного поршня на два порядка выше скорости нормального горения. Частота циклов может варьироваться путем независимого инициирования детонации контролируемой системой зажигания. Поэтому одним из основных прорывных направлений является разработка непрерывно-детонационных и ротационно-детонационных двигателей.

Совершенствование двигательных установок заключается главным образом в повышении удельной мощности реализации запасенной энергии при минимальном изменении массогабаритных характеристик. Аналитический и численный анализ модели обобщенного пульсирующего детонационного двигателя показал перспек-

тивность использования этого устройства в авиации и ракетной технике. Детонационный двигатель использует термодинамически эффективный цикл при постоянном объеме. Весогабаритные характеристики детонационного двигателя соизмеримы с характеристиками турбореактивного двигателя. Преимущество детонационного двигателя с автоматическим подсосом воздуха в полете состоит также в том, что в нем отсутствуют движущиеся части.

По оценкам прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД), использующие детонационное сгорание топлива, должны иметь максимально возможную термодинамическую эффективность. По сравнению с ПВРД на обычном горении двигатель на детонации в идеале обеспечит топливную экономичность до 30 % при числе Маха полета 2,5 и до 20 % при числе Маха 3, что позволит значительно увеличить дальность полета аппарата с таким двигателем или заменить значительную часть топлива на полезную нагрузку. Другое принципиальное отличие детонационного ПВРД от ПВРД на обычном горении — его способность создавать реактивную тягу при низких скоростях полета вплоть до самостоятельного старта без разгонных устройств.

Одна из возможных схем организации детонационного цикла в сверхзвуковом летательном аппарате включает диффузор, механический клапан, связку детонационных труб и общее сопло. Трубы периодически заполняются топливно-воздушной смесью. Смесью периодически сгорает в бегущих детонационных волнах, а горячие продукты детонации выбрасываются с высокой скоростью в окружающее пространство через сопло, создавая реактивную тягу. Существуют аналогичные схемы организации детонационного цикла без механических клапанов, т. е. в конструкции двигателя вообще отсутствуют подвижные элементы. Конструктивно такой двигатель — импульсный детонационный двигатель (ИДД) — прост, а его тягу можно

практически неограниченно увеличивать, повышая количество детонационных труб. Кроме того, изменяя подачу топлива в трубы, можно управлять вектором тяги без применения поворотных рулей. Импульсные детонационные двигатели весьма привлекательны и по своим потенциальным тяговым характеристикам: они перекрывают широкий диапазон скоростей полета от 0 до числа Маха 4÷5, обеспечивая почти постоянный удельный импульс по топливу на уровне 2000÷2500 с при работе на углеводородном горючем. При числе Маха полета выше 3 импульсный детонационный двигатель становится эффективнее не только ПВРД, но и турбореактивного двигателя [4].

Основные приложения таких двигателей — дешевые средства доставки боеприпасов, силовые установки для самолетов-мишеней и беспилотных летательных аппаратов, а также крылатых ракет. В перспективе они могут использоваться и для форсирования тяги пилотируемых летательных аппаратов.

Для создания ИДД нет фундаментальных ограничений, однако есть эксплуатационные: чтобы успешно конкурировать с существующими аналогами, такой двигатель должен работать на штатном авиационном керосине без активных добавок, использовать минимальную энергию зажигания детонации, быть компактным и легким. Однако для инициирования детонации керосино-воздушной смеси в трубе с помощью известных классических способов требуются либо огромные энергии зажигания, либо очень длинные трубы, что неприемлемо для силовых установок летательных аппаратов. Поэтому решается фундаментальная задача — найти новые способы инициирования детонации, которые позволят значительно уменьшить энергию инициирования детонации, значительно сократить длину и время перехода горения в детонацию. Сейчас удастся получить периодическую детонацию керосино-воздушной смеси на длине 1,5 м при зажигании обыч-

ной автомобильной искрой. Энергия зажигания детонации понизилась более чем в 10000 раз, одновременно длина трубы уменьшилась более чем в 10 раз.

Ведущие позиции по разработке детонационных двигателей занимает специализированный центр Seattle Aerosciences Center (SAC) компании Pratt and Whitney, исследовательский центр United Technologies Research Center (UTRC) и фирма Boeing Phantom Works. Проекты по детонационному горению в США включены в программу разработок перспективных двигателей IHPDET. В кооперацию входят практически все исследовательские центры, работающие в области двигателестроения, многие научные центры и университеты. Большой объем работы по клапанному детонационным двигателям выполнен в Институте химической физики РАН (ИХФ). В России над этой проблемой работают многие университеты и институты Российской Академии наук (РАН): ЦИАМ им. П. И. Баранова, ИХФ, Институт машиноведения РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Новосибирский институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева (ИГиЛ), ИТПМ им. С. А. Христиановича, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, МГУ, Московский государственный авиационный институт, Новосибирский государственный университет, Чебоксарский государственный университет, Саратовский государственный университет и др.

В зависимости от скорости распространения детонационной волны в системе координат, связанной с двигателем, различают стационарную детонацию (stationary detonation), ротационную детонацию (rotating detonation), когда детонация является стационарной во вращающейся системе координат, нестационарную детонацию (transient detonation) и пульсирующую детонацию (pulsating detonation). Соответственно, могут быть созданы детонационные двигатели с непрерывной детонацией (CDE), ротационно-детонационные двига-

тели (RDE) и импульсно-детонационные двигатели (PDE).

Основными направлениями развития детонационных двигателей по данным многочисленных публикаций являются:

1. Классический клапанный импульсный детонационный двигатель.

2. Многотрубный PDE. В таких двигателях частота работы отдельной трубы остается низкой, но за счет чередования импульсов в разных трубах пытаются получить приемлемые удельные характеристики.

3. PDE с высокочастотным резонатором. Предварительно активированная топливная смесь подается в резонатор, в котором происходит фокусировка волн сжатия с образованием пересжатой детонационной волны.

4. Детонационный ЖРД с вытеснительной подачей топлива.

5. Организация детонационного горения в стационарной системе ударных волн (CDE) или в периодически перемещающейся ударной волне (CPDE).

6. Ротационный детонационный двигатель Николса.

7. Ротационный двигатель Б. В. Войцеховского.

Силовые установки на детонации природного газа. Эксплуатационные требования по весу, геометрическим размерам и рабочей частоте ИДД относятся главным образом к силовым установкам летательных аппаратов (ЛА). Для стационарных же энергетических установок эти требования не являются определяющими, и, следовательно, технологический прорыв в этом направлении следует ожидать в ближайшее время. Наиболее привлекательное направление работ — организация циклической детонации смесей природного газа с воздухом. В настоящее время в ИХФ РАН и МИФИ (ГУ) активно ведутся работы по организации импульсного детонационного сжигания природного газа с использованием новых комбинированных средств инициирования детонации. Успех на этом пути сулит существенную экономию природного

газа и позволит значительно повысить эффективность работы энергетического оборудования, в частности силовых установок газоперекачивающих агрегатов (ГПА) для магистральных газопроводов. Последнее приложение особенно важно ввиду острой необходимости снижения собственного потребления природного газа газотранспортными компаниями. Разумеется, замена жаровых труб в газотурбинных установках ГПА на детонационные потребует дополнительных вложений (разработка устройств, сглаживающих импульсные ударные нагрузки на элементы турбин, и др.), однако экономический эффект, ожидаемый от новой технологии, несомненно, перекроет все сопутствующие затраты.

Силовые установки надводных и подводных аппаратов и транспортных средств различного назначения. Принцип нового типа движителя для скоростного водного транспорта — прямоточного импульсно-детонационного гидрореактивного движителя (ИДГРД) — предложен в работах [5]. В ИДГРД гидрореактивная тяга создаётся импульсно периодическими ударными волнами, выходящими в прямоточный водовод из камеры сгорания (КС), в которой происходит циклическое импульсно-детонационное сгорание топлива.

Периодическое вытеснение забортной воды из водовода происходит под действием расширяющихся продуктов детонации горючей смеси, в котором заборная вода, поступающая в проточный водовод, барботируется газом с образованием сжимаемой двухфазной пузырьковой среды, а при взаимодействии детонационной волны с пузырьковой средой в эту среду проникает ударная волна, вовлекающая ее в движение, так что вытеснение среды через выходное сечение водовода вызвано не только действием расширяющихся продуктов детонации горючей смеси, но и действием ударной волны. Соответствующий водометный импульсный детонационный двигатель представляет собой водовод (профилированную трубу с водоза-

борным устройством и соплом, погруженную в воду) с введенной в него импульсно-детонационной трубкой. Импульсно-детонационная трубка предназначена для генерации коротких, но очень интенсивных периодических импульсов давления в виде ударных волн, выходящих в водовод и выбрасывающих забортную воду из водовода через сопло. Двигатель может содержать несколько камер сгорания, причем в каждой камере сгорания установлены источники зажигания и форсунки подачи топлива, окислителя и продувочного газа, а на выходе из камер сгорания последовательно установлены ускоритель пламени, детонационная труба с выпускными окнами, оборудованными клапаном, причем каждая детонационная труба присоединена к проточному водоводу, снабженному общим водозаборником, а также аэраторами и/или кавитаторами. Преимущества импульсно-детонационного горения обеспечивают минимальные потери динамического напора воды, обусловленного движением надводного или подводного аппарата.

В отличие от других известных движителей в ИДГРД происходит прямое преобразование химической энергии топлива в кинетическую энергию направленного движения забортной воды, т. е. в нём отсутствуют какие-либо промежуточные подвижные элементы типа гребного винта, импеллера и т. д. Наибольшая эффективность передачи количества движения от ударных волн к забортной воде (наибольший удельный импульс) достигается при газосодержании воды в водоводе на уровне 20÷25 %, т. е. рабочее тело в водоводе — сжимаемая пузырьковая жидкость. Такое газосодержание воды может быть обеспечено газообразными продуктами детонации предыдущего цикла.

Возможные применения ИДД. В связи с дороговизной земли возрастает доля высотного строительства. В её стоимости противопожарные системы и их обслуживание весьма весомы. Они сложны, требуют по-

стоянного обслуживания и часто выходят из строя именно при пожарах. Наземные транспортные средства, в их лучших образцах, не могут подать материалы и оборудование на высоту более 60 м. Обеспечение пожарного ведомства дешевой и надежной аэромобильной техникой позволит снизить стоимость квадратного метра жилья и стоимость его обслуживания, что может дать дополнительные финансовые ресурсы. По топливной эффективности летающая платформа значительно уступает вертолету [6]. Использование пульсирующего двигателя в качестве усилителя тяги позволит уменьшить это различие и успешно конкурировать в тех областях, где использование вертолета недостаточно выгодно, имеет ограничения или невозможно, например, для противопожарного обслуживания высотных объектов. Летающая платформа может быть использована как безопорное транспортное средство в системе МЧС для противопожарного обслуживания высотных объектов, для судов с малым водоизмещением — как ЛА корабельного базирования, а также как носитель системы залпового огня или средств ПВО, имеющий возможность быстро занимать позицию для пуска вне зависимости от состояния грунта и рельефа местности и быстро уходить с занятой позиции.

Применение ГД в энергетике. Горелочные устройства. В существующих горелочных устройствах химическая энергия горючего преобразуется в тепло и механическую работу за счет медленного горения — дефлаграции. При детонации химическая реакция окисления горючего протекает в режиме самовоспламенения при высоком давлении за сильной ударной волной. Если при дефлаграции воздушных смесей углеводородных горючих мощность тепловыделения с единицы площади поверхности фронта реакции составляет $\sim 1 \text{ МВт/м}^2$, то мощность тепловыделения в детонационном фронте приблизительно на 4 порядка выше — $\sim 10000 \text{ МВт/м}^2$. Кроме того, в отличие от продуктов медленного

горения продукты детонации обладают огромной кинетической энергией: скорость продуктов детонации в $\sim 20\div 25$ раз выше скорости продуктов медленного горения. Если вместо существующих камер сгорания с непрерывным горением использовать импульсно-детонационные камеры сгорания с периодическим заполнением камеры горючей смесью и сгоранием смеси в бегущей волне детонации, то такие камеры сгорания могли бы дать большие выгоды при использовании в энергетике благодаря совмещению комбинированного ударно-волнового (механического) и теплового воздействий на объекты, обдуваемые продуктами детонации [7].

Импульсно-детонационное горение в энергетике не применяли в связи с проблемой циклического инициирования детонационной волны: для получения детонации в каждом цикле необходимо использовать либо очень мощный источник энергии, генерирующий сильную ударную волну (УВ), либо обеспечить переход горения в детонацию (ПГД), используя, например, очень длинные гладкие трубы или трубы с регулярными препятствиями. Детонационная способность воздушных смесей практических топлив при нормальных условиях очень низка. В [7] впервые экспериментально доказана возможность управляемого циклического ПГД в трубе диаметром 94 мм с открытым концом на длине около $2,5\div 3,0$ м (с учетом размера форкамеры и устройства ускорения пламени) при раздельной непрерывной подаче природного газа и воздуха. Максимально возможная частота детонационных циклов в созданном образце ИДГУ — около 30 Гц. Такую частоту циклов можно получить при «мгновенном» заполнении трубы горючей смесью. При использовании высоконапорных компрессоров скорость заполнения может достигать $\sim 100 \text{ м/с}$, и на образце ИДГУ можно получить достаточно высокую частоту импульсов до $\sim 15 \text{ Гц}$.

Проблема инициирования детонации была решена в результате тщательного

подбора формы и расстановки препятствий турбулизаторов, обеспечивающих оптимальное согласование темпов ускорения пламени и усиления УВ, впервые экспериментально доказана возможность быстрого циклического ПГД в условиях высокоскоростного течения (~ 10 м/с) с отдельной подачей топливных компонентов — природного газа (98,9 % метана) и воздуха — в трубе диаметром 150 мм с открытым концом при слабом источнике зажигания с энергией ~ 1 Дж. Достигнутая на экспериментальной установке максимальная частота циклов — 2 Гц. Результаты исследований используются при разработке промышленного горелочного устройства нового типа — импульсно-детонационной горелки для скоростного нагрева и фрагментации, совмещающей комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения: тепловое и ударно-волновое (механическое).

Опытный образец ИДГУ имеет следующие основные технические характеристики [7]: тепловая мощность — от 2000 до 2500 кВт (соответствует мощности наиболее распространенных скоростных горелок обычного типа); максимальная скорость продуктов детонации в выходном сечении — регулируемая, от 400 до 1500 м/с; рабочая частота — регулируемая, от 0,01 до 2 Гц; максимальная температура продуктов детонации в выходном сечении — регулируемая, от 1400 до 2500 °С; максимальное избыточное давление продуктов детонации в выходном сечении — регулируемое, от 2 до 14 атм; энергия зажигания — не более 1,0 Дж; длина горелочного тракта — не более $5\div 6$ м. Указанные характеристики должны быть достигнуты при сниженном расходе природного газа и сниженной эмиссии оксидов азота по сравнению с существующими скоростными горелками равной тепловой мощности. Горелка предназначена для применения в нагревательных печах металлургической и других отраслей промышленности, а также в различных теплоэнергетических установках.

Максимальное значение стационарной температуры (~ 500 °С) достигается приблизительно через 200 с работы горелки у внутренних элементов — препятствий турбулизаторов, расположенных в той части горелочного тракта, через которую циклически «пробегают» волна детонации [7]. Стенки в этой части горелочного тракта нагреваются до ~ 420 °С за время порядка 1000 с. В той части горелочного тракта, через которую циклически «пробегают» волна дефлаграции, стенки и внутренние элементы нагреваются до стационарной температуры, не превышающей ~ 330 °С. Поэтому принудительное охлаждение горелки требуется только на тех участках горелочного тракта, через которые циклически «пробегают» волна детонации.

Производство электроэнергии. Импульсно-детонационное сжигание может быть использовано, например, на электроэнергетических предприятиях или на промышленных предприятиях в составе различных технологических комплексов для получения электромеханической энергии, в том числе в арктических условиях. Предложен способ, в котором ударные волны и импульсные высокоскоростные струи продуктов детонации, перед тем как направляться на традиционный турбоагрегат, сначала приводят во вращение массивный зубчатый маховик, а высокотемпературные продукты детонации далее используются для получения тепловой, механической и электрической энергии с помощью известных газо- и паротурбинных энергетических установок. Предложенный способ реализован в предложенном устройстве, включающем импульсно-детонационную трубу, промежуточный демпфирующий объем, турбоагрегат, системы подачи воздуха и горючего, систему зажигания и систему охлаждения, в котором к импульсно-детонационной трубе присоединены зубчатый маховик в герметичном корпусе и промежуточный демпфирующий объем, из которого высокотемпературные продукты детонации да-

лее поступают на известные газо- и паротурбинные энергетические установки для получения тепловой, механической и электрической энергии.

В детонационных газотурбогенераторах для производства электроэнергии используется турбина. Введение в конструкцию детонационного газотурбогенератора эжектора позволяет уменьшить вредное воздействие пульсирующего потока продуктов детонации на элементы турбины и ослабить параметры детонационной волны. В интегрированном сопле газовые потоки из отдельных детонационных камер смешиваются с эжектируемым воздухом. Инжектирование воды в ДК и эжектирование воздуха в сопле дает прибавку к массе и увеличивает импульс истекающей реактивной струи, снижает температуру газов перед турбиной и демпфирует ударную волну. По патенту РФ 2418968 предложен принцип создания подводного детонационного генератора со сдвоенной турбиной, работающей как от выхлопных газов детонации, так и в качестве гидротурбины от восходящего водного потока.

Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Известны методы прямого и непрямого (машинного) преобразования тепловой энергии в электрическую. Высокую эффективность прямого преобразования тепловой энергии способны обеспечить магнетогидродинамические генераторы (МГД-генераторы). Для ионизации продуктов сгорания необходимо поддерживать температуру на уровне 10000 К, при использовании легкоионизирующих присадок температура может быть снижена в 4÷4,5 раза. Перспективным является использование детонационного МГД-генератора со сверхвысокой скоростью высвобождения химической энергии. В детонационном цикле температура продуктов сгорания составляет 4000 К и более, а скорость их движения является сверхзвуковой. Мощность, приходящаяся на единицу объема детонационной камеры (удельная мощность), на

2 порядка выше, чем камеры ракетного двигателя. Исследованиями детонационных систем занимаются в корпорациях General Electric, Boeing, в исследовательских центрах NASA, BBC США, в компаниях Aerojet Rocketdyne, Pratt & Whitney и др. В ближайшие годы на крейсерах ВМС США планируется замена газотурбинных электрогенераторов на детонационные установки. По патенту РФ 2418968 предложен способ прямого преобразования энергии импульсного детонационного сгорания топлива в электрическую энергию и генератор переменного тока для его реализации.

Роль компактных источников электроэнергии повышается в связи с потребностью автономного питания как космических аппаратов, так и техники, работающей в сложных климатических условиях. Разрабатываются принципы генерации электроэнергии на основе непрерывной спиновой детонации, совмещающей положительные качества стационарных (непрерывность работы) и импульсных (повышенная электропроводимость во фронте детонационной волны) МГД-систем [8].

Импульсная очистка поверхностей нагрева. Повышение эффективности работы паровых и водогрейных котлов, технологических агрегатов, сжигающих различные виды жидкого и твердого топлива, может быть достигнуто предотвращением загрязнения их поверхностей нагрева золовыми отложениями. Традиционные средства очистки поверхностей нагрева недостаточно эффективны и трудозатратны. Разработаны и внедрены системы газоимпульсной очистки (ГИО) с импульсными камерами, которые предназначены для очистки от отложений конвективных поверхностей нагрева промышленных котлоагрегатов, а также котлов коммунальной энергетики малой мощности [9]. Принцип работы таких систем заключается в воздействии на отложения, образующиеся на поверхностях нагрева направленных ударных и акустических волн, генерируемых за счет детонационного горения газозооной сме-

си в импульсной камере, размещаемой вне газохода котла. Истекающие из импульсной камеры со сверхзвуковой скоростью продукты сгорания производят комплексное волновое и термогазодинамическое воздействие на наружные отложения, теплообменные и ограждающие поверхности. Системы ГИО обеспечивают равномерную очистку поверхностей нагрева, работающих в среде как нейтральных, так и агрессивных газов. Затраты на внедрение систем ГИО только за счет экономии топлива окупаются в срок от полугода до года.

Выводы:

1. Детонационный режим горения газов отличается от обычного (дефлаграционного) более быстрым выделением энергии, более высокими температурами и давлением продуктов сгорания. Термодинамически детонация является наиболее эффективным способом прямого сжигания горючего. Широкое практическое применение технологий и устройств, основанных на использовании явления газовой детонации, затруднено поиском способов инициирова-

ния детонации, которые позволят значительно уменьшить энергию инициирования детонации, значительно сократить длину и время перехода горения в детонацию.

2. Наряду с продолжением интенсивных фундаментальных исследований явления газовой детонации развиваются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию управляемой детонации в двигателях, энергетических установках, технологических горелках, других устройствах и технологиях различных отраслей промышленности.

3. Многочисленные исследования и разработки показывают перспективность использования явления газовой детонации для создания детонационных двигателей в авиации, космической и других отраслях.

4. В энергетике явление газовой детонации представляет существенный практический интерес для создания более эффективных горелочных устройств, компактных устройств получения электроэнергии, очистки поверхностей нагрева.

Библиографический список

1. Зельдович, Я. Б. Теория детонации [Текст] : учеб. пособ. / Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеец. — М. : Гостехиздат, 1955. — 268 с.
2. Баженова, Т. В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме [Текст] / Т. В. Баженова, В. В. Голуб // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39. — № 4. — С. 3–21.
3. Evaluation of a hybrid-piston pulsed detonation engine / B. Frankey, F. Schauer, R. Bradley, J. Hoke // AIAA 2002-0474 : 40th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. — 2002. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA454348.pdf>.
4. Булат, П. В. Обзор проектов детонационных двигателей. Импульсные двигатели [Текст] / П. В. Булат, Н. В. Продан // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 10–8. — С. 1667–1671; То же [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32641>.
5. Водомётный движитель с импульсно-детонационным горением жидкого топлива [Текст] / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, И. А. Садыков и др. // Доклады Академии наук. — 2017. — Т. 475. — № 3. — С. 281–285.
6. Подзирей, Ю. С. Одно из возможных направлений применения пульсирующего детонационного двигателя [Текст] / Ю. С. Подзирей // Двигатель. — 2010. — № 3 (69). — С. 22–24.
7. Импульсно-детонационное горелочное устройство на природном газе [Текст] / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, В. С. Иванов и др. // Химическая физика. — 2011. — Т. 30. — № 7. — С. 77–80.
8. МГД-эффекты при непрерывной спиновой детонации [Текст] / Е. Л. Попов, А. Н. Самсонов, Ф. А. Быковский, Е. Ф. Ведерников // Доклады Академии наук. — 2019. — Т. 484. — № 5. — С. 550–553.

9. О внедрении систем импульсной очистки поверхностей нагрева. Опыт сотрудничества с предприятиями котлостроения [Текст] / А. П. Погребняк, В. Л. Кокорев, А. Л. Кокорев, И. О. Моисеенко и др. // *Новости теплоснабжения*. — 2014. — № 1. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2819 (дата обращения: 27.11.2021).

© Харламов Ю. А.

© Петров П. А.

© Козакишен В. А.

© Изиумов Ю. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневским Д. А.,
д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.*

Статья поступила в редакцию 29.11.2021.

Doctor of Technical Sciences Kharlamov Yu. A., PhD in Engineering Petrov P. A., PhD in Engineering Kozachishen V. A., PhD in Engineering Iziunov Yu. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)
DETONATION-GAS TECHNOLOGIES AND DEVICES: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT. REPORT 1. GAS DETONATION AND ITS APPLICATION IN ENGINES AND POWER ENGINEERING

The essence, advantages and disadvantages of detonation combustion of gases, its energy efficiency and promising areas of use are briefly considered. Report 1 systematizes data on the practical use of the phenomenon of gas detonation for the improvement and development of new types of internal combustion engines, as well as in the energy sector when creating energy-saving burners, generating electricity and cleaning the heating surfaces of units burning various types of liquid and solid fuels.

Key words: *explosive technologies, detonation-gas devices, power equipment, burner devices, deflagration, detonation wave, stationary detonation, rotational, non-stationary, pulsating.*

УДК 531.31.15+669

к.т.н. Левченко Э. П.,
к.т.н. Вишневский Д. А.,
к.э.н. Зинченко А. М.,
к.т.н. Левченко О. А.,
Мороз В. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

ОСОБЕННОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ОДНОВАЛКОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ДРОБИЛОК ГОРЯЧЕГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО АГЛОМЕРАТА

Работа посвящена анализу, развитию и усовершенствованию типовых конструкций одновалковых зубчатых дробилок, широко применяемых в агломерационном производстве для разделения на фракции предварительно полученного методом высокотемпературного спекания шихты агломерационного пирога. Рассмотрены направления совершенствования конструкций рассматриваемых дробилок и перспективы их дальнейшего развития.

Ключевые слова: *одновалковая зубчатая дробилка, горячий агломерат, дробление, усовершенствование конструкции, многоступенчатая обработка.*

Существенным фактором повышения эффективности доменного производства чугуна является улучшение условий работы печей, в том числе и за счет лучшей фракционной подготовки железорудного агломерата, что обеспечивает повышение их производительности при одновременном сокращении потребления кокса.

Процесс агломерации представляет собой окускование сыпучих материалов (в основном руд), служащих исходным сырьем перед выплавкой металлов, так как пылеватые материалы для непосредственной переплавки практически не пригодны по причине резкого снижения эффективности процесса. В дальнейшем таким образом спеченный пирог подвергается дроблению с целью получения кусков эффективных размеров, пригодных для плавки, а мелкие частицы отсеиваются и поступают на новый цикл окускования.

Предварительная фракционная подготовка материала связана с тем, что шихта, загруженная на колошник доменной печи при непрерывном опускании на высоту рабочего пространства печи (28–30 м) в среднем за 5–6 ч, постепенно превращается в шлак, чугун и газ. Навстречу шихте движутся печные газы — продукты горе-

ния кокса у фурм доменной печи и газообразные продукты ряда сложных реакций, происходящих в нижних горизонтах печи. Ввиду значительной скорости встречных газов, проходящих печь за 3–5 секунд при обычном давлении газа на колошнике $107,9 \text{ кН/м}^2$ (1,1 атмосферы) и за 5–6 секунд при повышенном давлении в рабочем пространстве печи до 245 кН/м^2 (2,5 атмосферы) на колошнике, они обладают существенным подъемным эффектом, за счет чего из печи выносятся частицы сырья размерами до 3–4 мм при работе с повышенным давлением газов в печи. При давлении на колошнике в $107,9 \text{ кН/м}^2$ (1,1 атм) из печи выносятся частицы шихты размером меньше 5–6 мм [1].

Следовательно, при загрузке значительная часть пылевой руды выносится газом из печи и затем оседает в пылеуловителях. Полное усвоение пылевой шихты печами возможно только при условии ее предварительного окускования. Все сказанное относится к пылевой руде, колошниковой пыли и в особенности к концентрату. Причем загрузка железорудного концентрата в печь без окускования не имеет смысла, т. к. он полностью выносятся газом из печи.

Влияние крупности кусков на газопроницаемость столба шихтовых материалов [2] показало, что в основном выносятся железорудные материалы крупностью до 2,3 мм, а отсеивая фракцию 0–2 мм полностью, можно загружать в доменную печь в ограниченном объеме мелкие фракции (2–5 и 1–4 мм) без ухудшения газопроницаемости слоя [3].

Качество шихты ухудшают не только мелкие материалы, но и большие куски, требующие большего времени на сушку, прогрев, удаление летучих компонентов и восстановление [4]. Кроме того, в них имеется много различных дефектов и крупных пор неспекшейся шихты. Поэтому крупные куски агломерата представляют собой крайне неустойчивую систему, состоящую из основного вещества и различных перемычек, мостиков и т. п., стенки которых имеют различные трещины и дефекты; крупные фракции кокса и агломерата больше измельчаются, чем мелкие. На любом горизонте доменной печи эти куски оказываются менее прогретыми и восстановленными, чем куски меньших размеров. Крупные куски, разрушаясь, дают много мелочи.

Производство агломерата размерами 5–30 мм с содержанием класса 0–5 мм не более 8–9 % позволяет повысить производительность доменной печи на 10–14 % и снизить расход кокса на плавку на 8–10 %, что является значительным потенциальным фактором повышения экономической эффективности производства чугуна [2, 3, 5, 6]. В связи с этим оптимизация конструкции применяемых одновалковых дробилок и технологии дробления агломерата с точки зрения повышения надежности работы и стабилизации крупности готового агломерата является актуальной. Их устанавливают непосредственно за разгрузочной частью конвейерной машины. Последующий отсев фракций обеспечивается стационарными и вибрационными грохотами.

На лучших аглофабриках Японии, США, Франции, Италии и Германии в основном

загружают железорудный материал крупностью 5–35 мм, при этом в скипе содержится не более 5–7 % фракции 0–5 мм [7].

Это достигается тем, что фракционную подготовку агломерационного сырья осуществляют многостадийным способом, посредством последовательной обработки на нескольких дробильных машинах с постепенным понижением крупности.

На отечественных предприятиях черной металлургии применяется одноступенчатая схема разрушения пирога агломерата, что не позволяет в полной мере выровнять гранулометрический состав готового продукта по требуемой крупности. При этом отсутствие свободных площадей исключает возможность установки дополнительного оборудования для обеспечения многостадийной обработки.

В этой связи целью данной работы является разработка усовершенствованной конструкции одновалковой зубчатой дробилки на базе типовой машины при условии ее минимальной модернизации и сохранении имеющихся габаритов.

Объект исследования — технологический процесс дробления агломерационного спека в одновалковой зубчатой дробилке путем обеспечения многоступенчатой обработки исходного материала.

Предмет исследования — конструктивные схемы и закономерности процесса дробления агломерационного спека в многоступенчатой одновалковой зубчатой дробилке.

Задачи исследования:

- анализ и оценка существующих конструктивных схем одновалковых зубчатых дробилок;
- определение причин неравномерности гранулометрического состава готового продукта;
- выявление способов повышения эффективности обработки агломерационного спека на основе достижения выровненности крупности готового продукта.

Известно, что одной из первых для дробления агломерационного пирога применялась типовая конструкция дробилки (рис. 1),

в свое время серийно выпускаемая заводом тяжелого машиностроения «Электросталь» [8].

Она имела размеры валков 1000×2200 мм и была оснащена шестизубыми звездочками. Зубья соседних звездочек поочередно смещались на круглом валу на 30° , дробление спека осуществлялось между зубьями и поддробильной плитой с отверстиями. Отличительной особенностью являлось наличие между зубьями и плитой регулируемой щели в диапазоне от 100 до 200 мм, что одновременно являлось и не-

достатком, т. к. значительно снижало эффективность дробления аглопирога.

В настоящее время в современном агломерационном производстве широко используются конструкции дробилок, выпускаемых производственным объединением «Волгоцеммаш» (рис. 2), где длинные зубья звездочек проходят сквозь колосниковую решетку.

Технические характеристики отечественных одновалковых длиннозубчатых дробилок приведены в таблице 1 [9].

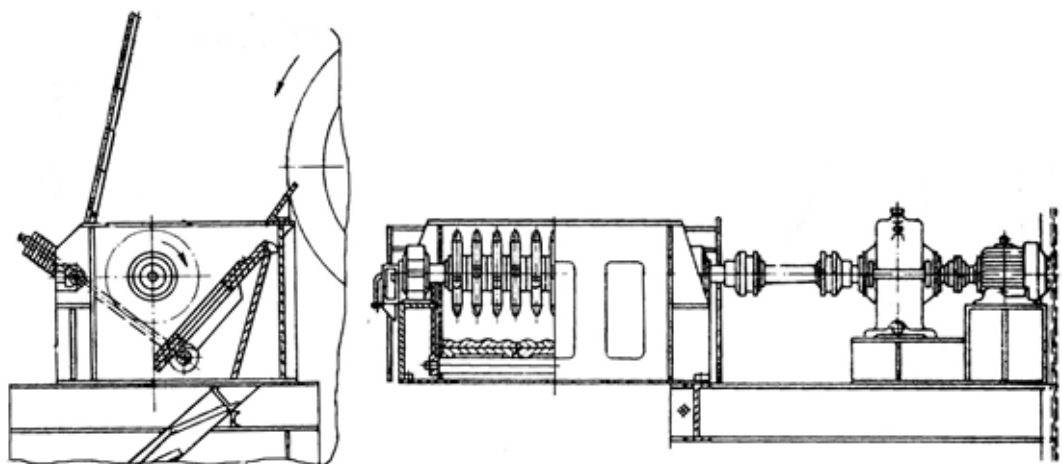
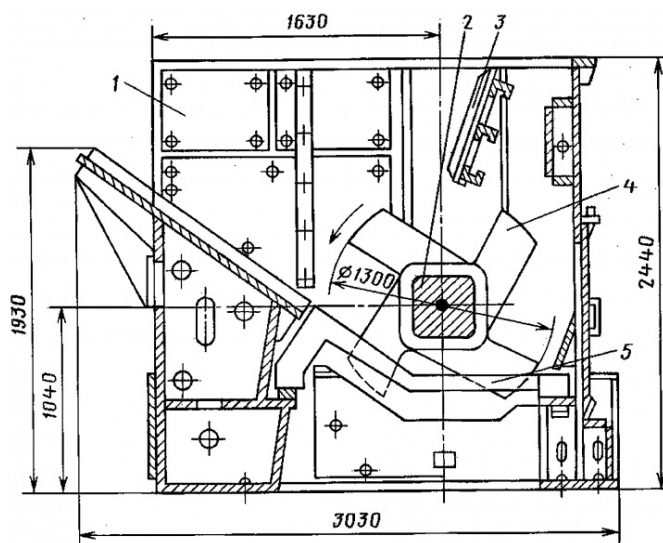


Рисунок 1 Конструктивная схема одновалковой зубчатой дробилки горячего агломерата, выпускаемой ранее заводом «Электросталь»



1 — корпус; 2 — вал; 3 — отбойная плита; 4 — зубчатый венец; 5 — колосники

Рисунок 2 Конструктивная схема одновалковой зубчатой дробилки горячего агломерата завода «Волгоцеммаш», применяемая в настоящее время

Таблица 1

Технические характеристики одновалковых дробилок

Показатель		СМД-1	СМД-2А	СМД-3Б
Размеры вала, мм	диаметр	1200	1300	1300
	длина	2100	2700	4200
Частота вращения вала, об/мин		3,2	4,7	3; 4,5; 6; 9
Наибольшие размеры загружаемого куска (агломерата), мм		250×1000×2000	250×1300×2500	400×1500×4000
Размер куска после дробления, мм		200	до 150	до 150
Ориентировочная производительность, т/год		80	200	800–900
Мощность двигателя, кВт		30	55	40; 60; 90; 125
Масса дробилки, т (без эл. двигателя)		22,3	27,8	52,7

Указанные дробилки предназначены для дробления горячего агломерата температурой 600–850 °С, поэтому для отвода теплоты, поступающей к цапфам вала при непосредственном контакте ротора с горячим агломератом, вал выполняют полым, и в нем предусмотрена циркуляция воды для охлаждения. Станина представляет собой сварную конструкцию из листового проката, в нижней ее части расположены сменные колосники, и боковые стенки облицованы износостойкими плитами. Вал ротора установлен на подшипниках качения. На валу насажены звездочки и дистанционные втулки.

При работе дробилки ротор захватывает звездочками поступающий в нее агломерат, дробит его и продавлиывает в зазоры колосниковой решетки.

Производительность зубчатой дробилки для агломерата упрощенно определяют по формуле [8]

$$Q = 60 \cdot \pi \cdot D \cdot n \cdot B \cdot s \cdot \rho \cdot \varphi, \quad (1)$$

где D — диаметр звездочек, м; n — частота вращения вала, об/мин; B — рабочая длина вала, м; s — размер разгрузочной щели между ступицами и зубьями звездочек для двухвалковых дробилок или между ступицами звездочек и колосниками одновалковых дробилок, м; ρ — плотность агломерата, т/м³; φ — коэффициент производительности, учитывающий разрыхление агломерата и использование длины вала ($\varphi = 0,2–0,6$).

Мощность приводного электродвигателя приближенно рассчитывается по формуле

$$N_{дв} = k_n \cdot B \cdot D \cdot n, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где k_n — опытный коэффициент, для агломерата средней прочности может быть принят равным 2.

Несмотря на большое распространение одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата, длительный производственный опыт показал, что выбранный в данном случае способ наложения разрушающих усилий в полной мере не позволяет обеспечить гарантированную выровненность гранулометрического состава готового продукта касательно его рациональной крупности, необходимой при доменной выплавке чугуна. Следовательно, необходимо дальнейшее усовершенствование подобных дробилок с тем учетом, что такая модернизация должна минимально затрагивать изменения типовой конструкции, т. к. металлургические предприятия очень неохотно относятся к серьезным изменениям устоявшихся технологических процессов.

Это существенным образом затрудняет задачу обеспечения условий разрушения агломерационного спека с получением его фракций, близких к оптимальным. Однако в ДОНГТИ уделяется постоянное внимание данному вопросу, что, например, позволило несколько преобразовать исполнение колосниковой решетки, через которую продавливается аглоспек, таким образом, что вместо

традиционного среза был организован сравнительно менее энергоемкий способ излома.

Проведенные экспериментальные исследования физической модели одновалковой зубчатой дробилки [10], изготовленной в масштабе 1:10 от реальных размеров (рис. 3, 4), показали, что при наличии перепада плоскостей верхних поверхностей колосников удельные затраты энергии сокращаются на 9–12 %, по срав-

нению с установкой верхних поверхностей колосников в одной плоскости. При этом величина перепада плоскостей существенной роли не играет, что характеризуется наложением линий на графике друг на друга. Это говорит о том, что возможно определение минимальной высоты перепада, при которой аглоспек может разрушаться с меньшими усилиями со стороны зубьев звездочек ротора.

P , кВт/кг

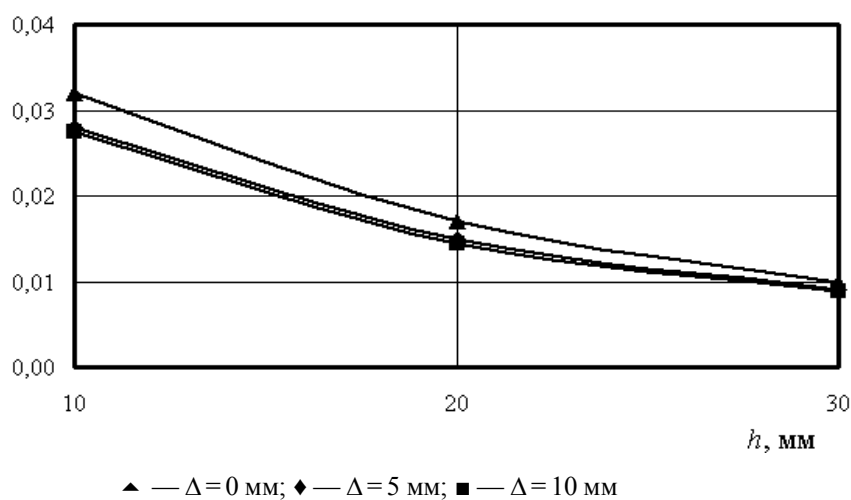


Рисунок 3 Удельные затраты электроэнергии на дробление при величине перепада

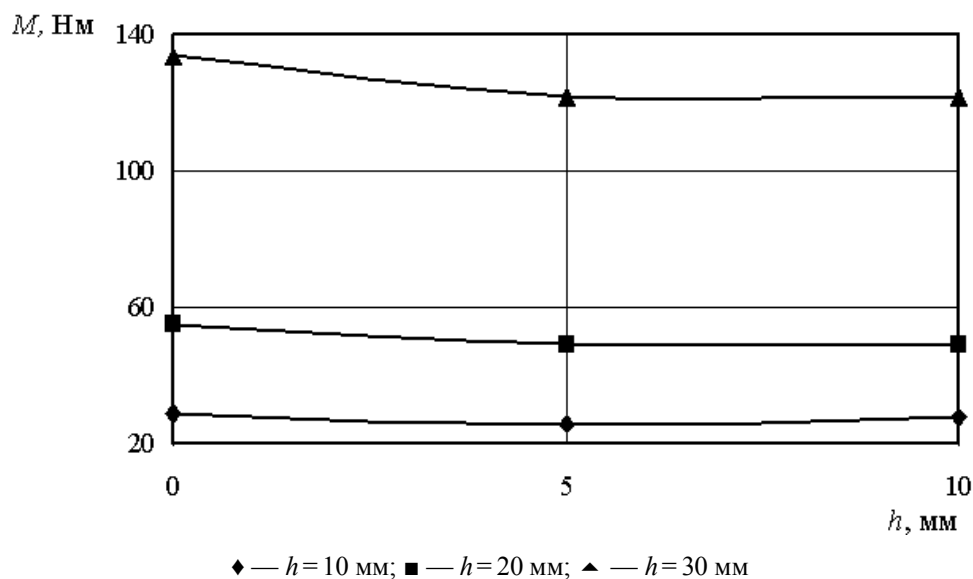


Рисунок 4 Зависимость крутящего момента от величины смещения верхних плоскостей колосников

Дальнейшее наращивание данной величины не влияет на результаты дробления. С увеличением толщины пирога крутящий момент увеличивается почти в два раза. Крутящий момент при размещении колосников с наличием перепада их верхних плоскостей ориентировочно на 9 % меньше, чем при их обычном размещении.

Также при исследованиях физической модели с помощью ситового анализа контролировалась крупность готового продукта (табл. 1).

Лучшие результаты по выходу качественного продукта соответствуют наименьшим высотам спекания, а перепад высот колосников, способствующий процессу излома при разрушении агломерационного пирога, сокращает количество крупных

кусков на 3–13 % и мелких частиц на 9–6 % при высотах от 30 до 10 мм соответственно.

Зависимость удельного расхода электроэнергии на дробление от предела прочности материала на сжатие представлена на рисунке 5. Можно предположить, что удельные затраты энергии на дробление агломерата пропорциональны его пределу прочности на сжатие. В результате проведения физического моделирования найдено качественное и количественное подтверждение правильности принятого технического решения. Выигрыш в удельных затратах зависит от механической прочности материала, подвергаемого дроблению. Чем выше прочностные характеристики, тем больше эффект снижения энергетических затрат на разрушение материала.

Таблица 1

Величина готового продукта

Исходная высота пирога, <i>h</i> , мм	Величина перепада верхних плоскостей колосников, Δ, мм								
	0			5			10		
	Выход классов, %								
	<0,5	>0,5<6	>6	<0,5	>0,5<6	>6	<0,5	>0,5<6	>6
10	13,6	42,2	43,2	12,8	53,9	33,3	12,3	54,6	33,1
20	17,2	39,6	44,2	15,6	38,7	41,9	15,3	42,9	41,8
30	20,7	28,2	51,1	18,8	31,4	49,8	19,0	31,3	49,7

P , кВт/кг

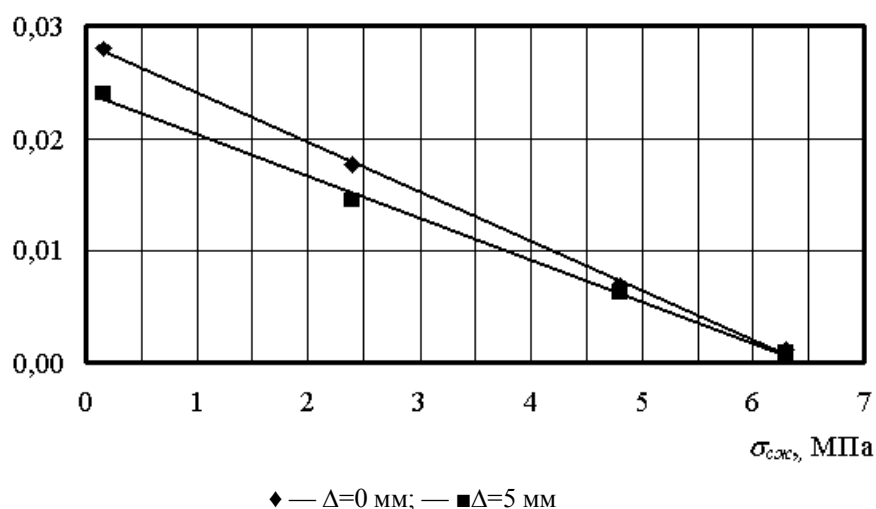


Рисунок 5 Зависимость удельного расхода электроэнергии на дробление

В производственных условиях исследовалась усовершенствованная конструкция одновалковой зубчатой дробилки (по декларационному патенту Украины № 9865), работающая в агломерационном цехе на агломашине № 6 ОАО «Алчевский металлургический комбинат» (г. Алчевск). При проведении исследований сначала в рабочей камере машины были установлены колосники в одной плоскости, а потом подняты через один относительно друг друга на 50 мм. Производственные испытания усовершенствованной конструкции проводились согласно договору о взаимном сотрудничестве.

Вместо разрушения агломерата путем среза (продавливания) в дробилке был организован процесс излома. При этом было установлено, что усилия, необходимые для разрушения аглопирога изломом, на 3,2 % меньше, чем усилия среза, а мощность, потребляемая электродвигателем, на 4,8 % ниже, по сравнению с процессом среза. Учитывая значительные объемы производства, достигающие на ОАО «АМК» 5 млн тонн в год, экономическая эффективность проведенной работы является очевидной.

Однако следует отметить, что такое решение также в полной мере не удовлетворяет образование частиц, крупность которых гарантирует наилучшие условия доменной плавки. Поэтому в настоящее время данное направление исследований активно развивается с целью создания в рабочей камере типовой одновалковой зубчатой дробилки многоступенчатой схемы, согласно которой воздействие зубьев звездочек ротора будет осуществляться на агломерат до тех пор, пока размеры его кусков не придут в соответствие с величиной зазоров в колосниковой решетке, играющей роль классификатора готового продукта. При этом видоизменяется лишь форма колосников (в виде полукруглой формы), на которых дополнительно организуются выступы для обеспечения многоступенчатого дробления. Возможность

такой схемы теоретически доказана и обоснована [11] в ранее проведенных исследованиях. Моделирование изменения фракционного состава при многоступенчатом дроблении возможно на основе математического решения матрицы [10], описывающей состояние крупности частиц:

$$Q = \begin{vmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ 0 & Q_{22} & \dots & Q_{2n} \\ 0 & 0 & \dots & Q_{nn} \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где Q_{ij} — часть материала с размерами после разрушения от Q_i до Q_{j+1} с предыдущими размерами от Q_i до Q_{j+1} ($i, j = \overline{1, n}$).

Однако решение ее в конечном итоге требует осуществления итерационного процесса, начинается со свободного приближения, что задает заблаговременно заданную точность. Для таких целей целесообразно применять численные методы.

В конечном же итоге любая зависимость, описывающая крупность конечного продукта на любом этапе его образования подчиняется экспоненциальной зависимости и может быть выражена уравнением Розина — Раммлера:

$$\frac{100}{R} = e^{m \cdot d^n}, \quad (4)$$

где R — суммарный остаток на сите с диаметром ячейки d , %; e — основание натурального логарифма; m и n — постоянные, характерные для данного материала.

В настоящее время ведется подготовка физической модели дробилки и лабораторной базы для организации поисковых и многофакторных экспериментов.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Выпускаемая конструкция одновалковой зубчатой дробилки горячего агломерата, широко применяемая в агломерационном производстве на многих предприятиях металлургической отрасли, хоть и обладает простотой и надежностью, однако в настоящее время является морально устаревшей.

2. Способ создания усилий разрушения преимущественно срезом характеризуется повышенными энергозатратами, и рекомендуется его замена на способ организации преимущественно излома за счет перепада поверхностей колосников.

3. Так как достичь в полной мере рациональной крупности товарного агломерата в обычной конструкции одновалковой зубчатой дробилки не удастся, то она нуждается в доработке путем создания в ее рабочей камере многоступенчатого наложения усилий на материал, чего реально дос-

тичь за счет изменения геометрической формы колосников.

4. Возможность многоступенчатого дробления агломерата в типовой одновалковой зубчатой дробилке доказана теоретически, поэтому требуется ее экспериментальное подтверждение.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методики ведения многофакторных исследований многоступенчатого дробления агломерата в типовой конструкции одновалковой зубчатой дробилки.

Библиографический список

1. Вегман, Е. Ф. Окускование руд и концентратов [Текст] / Е. Ф. Вегман. — М. : Металлургия, 1968. — 258 с.
2. Готлиб, А. Д. Доменный процесс [Текст] / А. Д. Готлиб. — М. : Металлургия, 1966. — 504 с.
3. Hirosidi, S. Influence of the particle size on the gas permeability of the column of charge materials [Text] / S. Hirosidi // J. Iron and steel. — 1985. — № 3. — P. 348–356.
4. Базилевич, С. В. Агломерация [Текст] / С. В. Базилевич, Е. Ф. Вегман. — М. : Металлургия, 1967. — 368 с.
5. Наукове обґрунтування та оптимізація технологічного процесу дроблення агломерату : звіт про НДР (пром.ж.) / Донбаський державний технічний університет. — Алчевськ, 2007. — 131 с. — № ДР 0295U003812.
6. Наукове обґрунтування та оптимізація технологічного процесу дроблення агломерату. Звіт про НДР (закл.ж.) / Донбаський державний технічний університет. — Алчевськ, 2007. — 203 с. — № ДР 0295U003812.
7. Базилевич, С. В. Всесоюзное совещание по подготовке руд к доменной плавке [Текст] / С. В. Базилевич, Е. Ф. Вегман // Сталь. — 1971. — № 12. — С. 1074–1075.
8. Притыкин, Д. П. Механическое оборудование заводов цветной металлургии. Ч. 1. Механическое оборудование для подготовки шихтовых материалов [Текст] / Д. П. Притыкин. — М. : Металлургия, 1988. — 392 с.
9. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. — М. : Машиностроение, 1990. — 320 с.
10. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата [Текст] : монография / О. А. Левченко, Э. П. Левченко, А. М. Зинченко и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 190 с.
11. Мороз, В. В. Анализ обеспечения возможностей организации многостадийной работы одновалковой зубчатой дробилки [Текст] / В. В. Мороз, В. И. Рубежанский, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып. 5 (50). — С. 153–157.

© Левченко Э. П.

© Вишневский Д. А.

© Зинченко А. М.

© Левченко О. А.

© Мороз В. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛНУ им. В. Даля Замотой Т. Н.

Статья поступила в редакцию 29.11.2021.

PhD in Engineering Levchenko E. P., PhD in Engineering Vishnevskiy D. A., PhD in Economics Zinchenko A. M., PhD in Engineering Levchenko O. A., Moroz V. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)
FEATURES OF MODERNIZATION OF SINGLE-ROLL CRUSHERS DESIGN OF HOT IRON-ORE SINTER

The work is devoted to analyzing, development and improvement of standard designs of single-roll crushers, widely used in sintering production for the separation into fractions of sintering cake previously obtained by high-temperature sintering. The directions of improving the designs of studied crushers and the prospects for their further development are considered.

Key words: *single-roll crusher, hot sinter, crushing, design improvement, multi-stage processing.*

ТРЕБОВАНИЯ
к рукописям научных статей в сборник научных трудов
государственного образовательного учреждения
высшего образования Луганской Народной Республики
«Донбасский государственный технический институт»

Научные статьи, предоставляемые в редакцию, должны соответствовать требованиям ВАК МОН ДНР (Приложение 1 к правилам формирования в уведомительном порядке перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (п. 4)) и базовым издательским стандартам по оформлению статей по ГОСТ 7.5–98 «Журналы, сборники, информационные издания».

Сборник научных трудов издаётся не менее 4 раз в год. Сборник формирует информационный отдел: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, ДонГТИ; тел./факс: (06442) 2-68-87, e-mail: info@dstu.education (тема: для редакции сборника научных трудов ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»); секретарь редакционной коллегии Скомская Светлана Анатольевна.

Сборник содержит следующие разделы: «Науки о земле», «Металлургия и материаловедение», «Машиностроение и машиноведение», «Строительство и архитектура».

Представляемые в статье материалы должны быть актуальными, отвечать новым достижениям науки и техники, иметь практическую значимость, соответствовать направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

Название статьи должно быть лаконичным и понятным, включать в себя объект и предмет исследований, иметь прямое отношение к области исследований и её результатам.

Обязательные элементы статьи:

- 1) постановка проблемы, обоснование её актуальности;
- 2) анализ последних исследований и публикаций по данной проблеме, вскрытие их недостатков и противоречий;
- 3) выделение не решённых ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;
- 4) формулирование цели, идеи, объекта и предмета исследований, постановка задач исследований;
- 5) описание и обоснование принятой методики исследований;
- 6) изложение основного материала теоретических и (или) экспериментальных исследований с обоснованием достоверности полученных научных результатов;
- 7) выводы о научной новизне и практической ценности результатов, направление дальнейших исследований.

По решению редколлегии в каждом номере сборника может быть опубликовано не более одной статьи обзорного характера, включающей большую часть рекомендованных выше основных элементов.

Редакция оставляет за собой право отклонять рукописи обзорного и компилятивного характера с нечётко сформулированными научными результатами, новизна и достоверность которых недостаточно обоснованы.

Результаты работы не должны предоставляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, несоблюдение действующих стандартов и недостоверность приведённых в статье данных полностью несут авторы статьи.

Статья должна сопровождаться:

- внутренней и внешней рецензиями;

– лицензионным договором с автором(и).

Текст статьи предоставляется на электронном носителе и в печатном виде, сопроводительная документация только в печатном виде.

Рекомендуемое количество авторов статьи — до 3-х человек. При необходимости, по решению редколлегии, количество авторов может быть увеличено до 5-ти.

Языки предоставления статей: русский, английский.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Текст рукописи статьи от 5 до 10 страниц в книжной ориентации на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее, нижнее — 27 мм; левое, правое — 24 мм. Различать колонтитулы чётных и нечётных страниц: от края до верхнего колонтитула — 2 см; от края до нижнего колонтитула — 2 см. Страницы не нумеруются. Рукопись статьи оформляется с применением редактора **MS Word в формате, полностью совместимом с Word 97–2003**: шрифт — Times New Roman, размер — 12 пт, интервал — одинарный, выравнивание — по ширине, абзацный отступ — 0,5 см.

Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **активирована**. Весь материал подаётся в чёрно-белом оформлении (без градиентов серого или цветовой палитры).

Не допускается использование списков (маркированных и нумерованных) и элементов «Надпись». **Запрещено использование стилей!**

Оформление статей

Статья подаётся отдельным файлом «*Статья.doc*».

УДК проставляется вверху, выравнивание по левому краю, шрифт полужирный, без абзацного отступа. УДК можно определить самостоятельно с помощью классификатора <https://teacode.com/online/udc>. Проверить корректность расшифровки известного УДК можно здесь — <http://scs.viniti.ru/udc/Default.aspx>.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, разделённые пробелом. С новой строки в круглых скобках через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. Шрифт полужирный, курсив, выравнивание по правому краю, без абзацного отступа.

С новой строки — название статьи. Выравнивание по центру, шрифт Arial, полужирный, видоизменение — все прописные, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца — 12 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. **Не допускается** набор всего названия заглавными буквами (Caps Lock).

С новой строки — краткая аннотация на языке статьи: размер шрифта — 11 пт, курсив. В аннотации сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

После аннотации с новой строки — ключевые слова (6–8 слов на языке статьи), курсивом, размером 11 пт, интервал после абзаца — «Авто». Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

С новой строки — текст статьи в **две колонки** одинаковой ширины, промежуток между колонками — 0,5 см.

Слова «рисунок» и «таблица» при упоминаниях в тексте пишутся полностью (пример: «... на рисунке 2 ...»), а в ссылках в конце предложения — сокращённо в скобках (примеры: «... схема инвертора (рис. 2).», «... получены экспериментальные данные (табл. 4).»).

После текста статьи полужирным шрифтом размером 11 пт располагается заголовок «Библиографический список»: интервал перед абзацем — 12 пт, после абзаца — 8 пт, выравнивание по левому краю.

Библиографический список оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления» размером 11 пт, курсивом и должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Рекомендованное количество ссылок — не более восьми источников с датой их издания не ранее чем 20 лет назад.

Оформление аннотаций отдельным файлом

Аннотация и ключевые слова дополнительно подаются на языке статьи отдельным файлом «*Аннотация.doc*», размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

Не допускается внедрение в текст аннотации объектов (формул, рисунков и т. д.).

Оформление рефератов отдельным файлом

Реферат подаётся на языке статьи отдельным файлом «*Реферат.doc*»: размер шрифта — 11 пт, без абзацного отступа, выравнивание — по левому краю. Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **выключена**.

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — учёная степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

С новой строки через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

Через интервал повторить данные для каждого автора.

Через интервал — название статьи (полужирным начертанием).

Через интервал — текст реферата. Реферат объёмом от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель, методика, результаты, научная новизна, практическая значимость. Фразы «Цель.», «Методика.», «Результаты.», «Научная новизна.», «Практическая значимость.» (для статьи на русском языке); «Aim.», «Technique.», «Results.», «Scientific novelty.», «Practical significance.» (для статьи на английском языке) размещаются с новой строки и выделяются полужирным начертанием. Реферат не должен повторять название статьи.

Не допускается внедрение в текст реферата объектов (формул, рисунков, и т. д.).

Рисунки

Рисунки вставляются в текст единым объектом и могут быть представлены:

– *растровыми форматами* — gif, tiff, jpg, bmp и им подобными (качество 300 dpi);

– *векторными форматами* — emf, wmf (графики, диаграммы).

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторный.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые, или на следующей странице. Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте и нанесены слева направо, сверху вниз. Перед рисунком интервал 12 пт. Выравнивание по центру, ширина в одну колонку (большие рисунки располагают на ширину страницы вверху или внизу). Рисунки размещают в тексте (не в таблицах), обтекание рисунка — «в тексте». Все рисунки подаются дополнительно отдельными файлами.

Допускается размещение пояснительных данных под иллюстрацией (подрисуночный текст) с выравниванием по центру, без абзацного отступа, размером 10 пт.

Под каждым рисунком (подрисуночным текстом) располагается надпись в формате «Рисунок № Название» с выравниванием по центру без абзацного отступа, интервалом перед и после абзаца — «Авто», размером шрифта 11пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. Статья не должна заканчиваться рисунком. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема статьи.

Формулы

Абзац, содержащий формулы, должен иметь следующие параметры: выравнивание по левому краю, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца 6 пт, позиции табуляции — 3,93 см по центру (для расположения формулы) и 7,85 см по правому краю (для расположения номера формулы). Формулы целиком (включая размерности) выполняются с помощью редактора формул **Microsoft Equation 3** или **MathType** математическим стилем, обычное начертание шрифта (нормальный), со следующими размерами:

Full (обычный).....	12 pt
Subscript/Superscript (крупный индекс)	9 pt
Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс)	7 pt
Symbol (крупный символ).....	14 pt
Sub-Symbol (мелкий символ)	12 pt
Формат	по центру
Междустрочный интервал	200 %

Недопустимо масштабирование и размещение формул в табличном формате. В одном блоке формулы, попадающем на границу колонок, допускается только одна строка (многострочные формулы разбиваются на блоки).

Упоминание элементов формул в тексте статьи также выполняется в редакторе формул.

Двоеточие перед формулой не ставится, независимо от правил пунктуации.

Таблицы

Все таблицы располагаются после упоминания в тексте и должны иметь нумерационный заголовок и название (размер шрифта 11 пт). Нумерационный заголовок (*Таблица 1*) выравнивается по правому краю над таблицей, курсив, интервал перед абзацем — 12 пт. С новой строки помещают название выравниванием по центру, без абзацного отступа, с запретом автоматического переноса слов в абзаце; интервал после абзаца — 6 пт.

Таблица выравнивается по центру контейнера, в книжной ориентации, шириной в 1 колонку (большие таблицы располагаются на ширину страницы вверх или вниз). Текст в таблице оформляется размером шрифта 11 пт или 12 пт без абзацного отступа. **Не допускается** заливка ячеек таблицы цветом. **Запрещается** располагать таблицу в альбомной ориентации. После таблицы отступается один интервал.

СОДЕРЖАНИЕ**НАУКИ О ЗЕМЛЕ***Ларченко В. Г., Шпакова А. О.*

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ОСЕДАНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД ОТ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ ...5

Шульгин П. Н.

300-ЛЕТИЕ ОСВОЕНИЯ ДОНЕЦКОГО КАМЕННОУГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

(ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ГОРНОГО ДЕЛА В ДОНБАССЕ) 11

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ*Рябичева Л. А., Коробко Т. Б., Дядичев А. В.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ ПРИ

ВЫДАВЛИВАНИИ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОРОШКОВОЙ ПОРИСТОЙ ЗАГОТОВКИ21

Бабанин А. Я., Чухаркин А. В.

УПРОЧНЯЮЩАЯ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ НАПЛАВКА КЛАПАНОВ

ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ..26

Снитко С. А., Денищенко Н. П., Яковченко А. В., Денищенко П. Н.

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ КРУГЛЫХ ПРОФИЛЕЙ32

Диментьев А. О., Должиков В. В., Михайлюк Г. Д., Карнов А. В.

ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗЕЙ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАВКИ

С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ХОДА ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ РАЗЛИЧНОГО ОБЪЕМА46

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА*Псюк В. В., Антошина Т. В., Псюк М. Ю., Никишина И. А.*

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЯ

ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ СОРТОПРОКАТНОГО ЦЕХА ФИЛИАЛА № 12

ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС»55

Будзило Е. Е., Горовая Н. А.

К ВОПРОСУ КАЧЕСТВЕННОГО ПРОВЕДЕНИЯ ОТДЕЛОЧНЫХ РАБОТ НА ПРИМЕРЕ

ОБСЛЕДОВАНИЯ ОКРАСКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ КОПРА

ШАХТЫ им. С. ТЮЛЕНИНА ГУП ЛНР «УГЛЕРЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ»65

Гречишкина Е. В., Псюк В. В.

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА МОНТАЖНО-ДЕМОНТАЖНЫЕ

ПРОЦЕССЫ ПРИ ЗАМЕНЕ ПОКРЫТИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ 71

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ*Харламов Ю. А., Петров П. А., Козачишен В. А., Изюмов Ю. В.*

ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА: СОСТОЯНИЕ

И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ. СООБЩЕНИЕ 1. ГАЗОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ

И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ДВИГАТЕЛЯХ И ЭНЕРГЕТИКЕ 81

Левченко Э. П., Вишневский Д. А., Зинченко А. М., Левченко О. А., Мороз В. В.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ОДНОВАЛКОВЫХ ЗУБЧАТЫХ

ДРОБИЛОК ГОРЯЧЕГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО АГЛОМЕРАТА 93

CONTENT**GEOSCIENCES**

<i>Larchenko V. G., Shpakova A. O.</i> DEPENDENCE OF THE ROCK SUBSIDENCE RATE ON THE INFLUENCING FACTORS	5
<i>Shulgin P. N.</i> 300th ANNIVERSARY DEVELOPING OF THE DONETSK COAL MINING BASIN (HISTORY OF THE EMERGENCE AND DEVELOPMENT OF MINING IN DONBASS)	11

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES

<i>Riabicheva L. A., Korobko T. B., Diadichev A. V.</i> EXPERIMENTAL STUDY OF BACK PRESSURE DURING EXTRUSION OF HOLLOW PARTS FROM A POWDERED POROUS BLANK	21
<i>Babanin A. Ya., Chukharkin A. V.</i> HARDENING AND RECOVERING SURFACING OF VALVES OF THE GAS DISTRIBUTION MECHANISM OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES	26
<i>Snitko S. A., Denishchenko N. P., Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N.</i> DEVELOPMENT OF THE THEORY AND TECHNOLOGY OF ROLLING ROUND PROFILES ..	32
<i>Dimentiev A. O., Dolzhikov V. V., Mikhailuk G. D., Karpov A. V.</i> STUDIES OF LINKS BETWEEN THE MAIN MELTING INDICATORS AND THE DRIVING RATE INTENSITY OF THE BLAST FURNACES OF DIFFERENT VOLUMES	46

CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

<i>Psiuk V. V., Antoshina T. V., Psiuk M. Yu., Nikishina I. A.</i> ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN STATE OF COATING STRUCTURES OF THE ROLL PRODUCTION ROLLING MILL OF BRANCH № 12 ZAO “VNESHTORGSERVIS”	55
<i>Budzilo E. E., Gorovaia N. A.</i> THE QUESTION OF QUALITATIVE FINISHING WORK ON THE EXAMPLE OF SURVEYING THE PAINTING OF METAL STRUCTURES OF PITHEAD OF MINE NAMED AFTER S. TYULENIN SUE LPR “UGLERESTRUKTURIZATIA”	65
<i>Grechishkina E. V., Psiuk V. V.</i> IDENTIFICATION OF THE MAIN FACTORS AFFECTING THE ASSEMBLING AND DISMANTLING PROCESSES AT REPLACING COATINGS OF INDUSTRIAL BUILDINGS	71

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Kharlamov Yu. A., Petrov P. A., Kozachishen V. A., Iziumov Yu. V.</i> DETONATION-GAS TECHNOLOGIES AND DEVICES: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT. REPORT 1. GAS DETONATION AND ITS APPLICATION IN ENGINES AND POWER ENGINEERING	81
<i>Levchenko E. P., Vishnevskiy D. A., Zinchenko A. M., Levchenko O. A., Moroz V. V.</i> FEATURES OF MODERNIZATION OF SINGLE-ROLL CRUSHERS DESIGN OF HOT IRON-ORE SINTER	93

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

**Collection of scientific papers
of Donbass State Technical Institute**

Collection

Issue 25 (68) 2021

**Establisher:
SEI HE "DonSTI" (LPR)**

*Certificate of the Ministry of Communications
and Mass Media of the LPR
for mass media registration III 000169
dated 08.12.2020*

*By order of the Department of Education and Science
of the Donetsk People's Republic of 2 May 2017
№ 464 the Collection of scientific papers is being
offered in the list of peer-reviewed scientific editions
with required publications of the main scientific PhD
and Doctor's thesis results, approved by an order of
the Department of Education and Science of
the Donetsk People's Republic of 1 November 2016
№ 1134, according to annex 1*

*By order of the Department of Education and Science
of the Lugansk People's Republic № 911-ОД
of 10.10.2018 the Collection of scientific papers of
DonSTI is being offered in the list of peer-reviewed
scientific editions with required publications of the
main scientific PhD and Doctor's thesis results,
approved by an order of the Department of Education
and Science of the Lugansk People's Republic
of 15 May 2018 № 477-ОД*

*Recommended by academic council
of SEI HE "DonSTI"
(Record № 5 dated 24.12.2021)*

Added to scientometrical database of RSCI

Format 60×84½
Conventional printed sheet 13,5
Order № 1

Circulation 100 copies
Publishing office is not responsible for material
content giving by author for publishing

Address of editorial office, publishing and establishing:
SEI HE "DonSTI"
Lenin avenue, 16, Alchevsk, LPR
94204
e-mail: info@dstu.education
web-site: <http://www.dstu.education>

PUBLISHING AND PRINTING CENTER
room 2113, tel/fax 2-58-59
Certificate of State registration for mass media
publisher, owner and distributor
МИ-СГР ИД 0000055 dated 05.02.2016

Editor-in-chief

Vishnevskiy D. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.,
Rector

Deputy Editor-in-chief

Kuberskiy S. V. — PhD in Engineering, Prof.,
Vice-Rector for Science

Editorial board:

Litvinskiy G. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Borshchevskiy S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Korneyev S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Leonov A. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Kharlamov Yu. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Asst. Prof.
Snitko S. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Dolzhikov V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Denischenko P. N. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Sholukh N. V. — Doctor of Arch., Prof.
Andriychuk N. D. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Pilavov M. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Bondarchuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Psiuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Skomskaya S. A. — secretary to the editorial board

For research scientists, PhD seekers, students of
higher educational institutions.

Issue language:
Russian, English

Computer layout
Ismailova L. M.

© SEI HE "DonSTI", 2021
© Chernyshova N. V., graphic cover
design, 2021