

ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Выпуск 15 (58) 2019



СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник
научных трудов
Донбасского государственного технического
университета**

Сборник
Выходит 1–4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 15 (58) 2019

**Збірник наукових праць
Донбаського державного технічного університету**

Збірник
Виходить 1–4 рази на рік
Заснований у червні 1999 р.
Випуск 15 (58) 2019

Collection of Scientific Papers of DonSTU

Collection
Publishing 1–4 times a year
Founded in June 1999
Issue 15 (58) 2019

Алчевск
2019

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

**Сборник научных трудов
Донбасского государственного
технического университета**

Сборник

Выпуск 15 (58) 2019

**Основатель:
Донбасский государственный технический
университет**

*Свидетельство Министерства информации,
печати и массовых коммуникаций ЛНР
о государственной регистрации средства массовой
информации МИ-СГР ПИ 000003
от 05.02.2016*

*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 ДонГТУ 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 ВПО ЛНР «ДонГТУ»
(Протокол № 3 от 25.10.2019)*

Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84½
Усл. печат. л. 16
Заказ № 274
Тираж 100 экз.

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

Адрес редакции, издателя и основателя:
ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный
технический университет»
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

Зинченко А. М. — к.э.н., ректор

Заместитель главного редактора

Куберский С. В. — к.т.н., проф.

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.

Финкельштейн З. Л. — 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.

Ульяницкий В. Н. — к.т.н., проф.

Зелинский А. Н. — к.т.н., проф.

Должиков В. В. — к.т.н., доц.

Денищенко П. Н. — к.т.н., доц.

Дрозд Г. Я. — д.т.н., проф.

Шолух Н. В. — д. арх., 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, украинский и английский

Компьютерная вёрстка и корректура
Исмаилова Л. М.

© ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019

© Чернышова Н. В., художественное
оформление обложки, 2019

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

GEOSCIENCES

УДК 622.28

проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)

ГОРНАЯ КРЕПЬ: ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ И КРИТЕРИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Дан краткий анализ существующих конструкций горной крепи. Показана диалектика её эволюции и прослежены тенденции развития. Сформулированы основные технические требования к деформационно-силовым показателям крепи. Обоснованы нормированные критерии её эффективности и работоспособности. Проведено численное сравнение эффективности разных крепей, выполнен анализ и прогноз эволюции их развития.

Ключевые слова: горная выработка, горная крепь, диалектика эволюции крепи, требования к крепи; деформационно-силовые показатели; коэффициент качества материала крепи; критерии эффективности и работоспособности, сравнение крепей, прогноз развития.

1 Актуальность и цель исследований

Крепление является одним из основных процессов при сооружении горных выработок и подземных объектов, а конструкция крепи — наиболее значимой статьёй расходов, удельный вес которой составляет от 40 до 70 % общих затрат. В зависимости от горно-геологических условий, форм проявлений горного давления (ПГД) и условий эксплуатации горной выработки нашли применение самые разнообразные типы крепи. Их появление было исторически обусловлено уровнем развития горной техники, требованиями безопасности и технико-экономической целесообразности [1–3].

Ретроспективный анализ последовательности развития конструкций крепи показал, что они прошли длительный и разветвлённый путь развития от простейших деревянных стоек до сложных комбинированных рамных и сплошных конструкций из разных материалов, главным образом из стали, бетона и железобетона [3, 4].

В настоящее время самой распространённой в горной промышленности (80–90 % протяжённости всех подготовительных выработок) стала стальная податливая крепь арочной и, много реже, трапециевидальной формы, выполненная из спецпрофиля СВП [1, 5]. Широкое распространение рамной крепи обусловлено её основ-

ными преимуществами — конструктивной податливостью, простотой изготовления, установки и ремонта. Однако эффективность применения этой крепи во многих случаях остаётся довольно низкой.

Эффективность инженерных решений по выбору крепи можно оценить с позиции успешности выполнения её основного назначения — устойчивости выработок. Для этого введём градацию крепей по результатам правильности принятых инженерных решений:

- удовлетворительно соответствует горно-геологическим условиям и нормам эксплуатации выработки — правильный выбор;
- недостаточно прочна, устойчива и надёжна, в итоге оказалась недопустимо деформированной — ошибка проектирования I рода;
- крепь принята с излишним запасом прочности — ошибка проектирования II рода.

Как показано в работе [5], около 20–30 % всей протяжённости подготовительных выработок находятся в неудовлетворительном состоянии и нуждаются в ремонте и перекреплении (ошибка I рода). Остальные 30–40 % закреплены с излишними расходами и могут охраняться менее мощными конструкциями крепи (ошибка II рода) и только 35–45 % отвечают условиям нормальной эксплуатации. Следует иметь в виду, что часто труднее всего идентифи-

цировать ошибку проектирования II рода, поскольку для этого необходим постоянный мониторинг состояния крепи разных конструкций.

Такой относительно низкий уровень надёжности инженерных решений в области крепления обусловлен неудовлетворительным объёмом и низким качеством исходных данных при проектировании, а также высокой изменчивостью и большим разнообразием горно-геологических условий. Созданное в горной отрасли положение с эффективностью поддержания горных выработок нельзя признать удовлетворительным.

Очевидно, что остаётся ещё достаточно много альтернативных вариантов создания новых конструкций крепи, что требует адекватной их оценки. Поэтому разработка теоретически обоснованных критериев эффективности и новых конструкций крепи является актуальной задачей для горной науки и промышленности. В частности, до настоящего времени остаются нерешёнными вопросы оценки и обоснованного эффективного выбора их конструкции.

Цель исследования — дать анализ эволюции развития горной крепи и обосновать критерии её эффективности.

Идея работы состоит в использовании безразмерных нормированных критериев технической эффективности крепи при анализе и оценке её конструкций.

Объектом исследования являются горные крепи различных конструкций и их технические показатели, **предметом** — закономерности эволюции, эффективность крепей и прогноз их развития.

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

1) краткий анализ эволюции развития крепи и формулирование требований к ней, исходя из особенностей её взаимодействия с массивом горных пород;

2) обоснование и разработка нормированных критериев технической эффективности горных крепей;

3) сравнение различных типов крепи на основе предложенных критериев её техни-

ческой эффективности и прогноз вектора её эволюции.

Решение поставленных задач позволит систематизировать, упорядочить и провести сравнительную оценку существующих и наметить пути создания новых конструкций горной крепи.

2 Вектор эволюции конструкций горной крепи

По области применения все крепи подразделяются на три большие группы в зависимости от назначения и требований к ним: для капитальных, подготовительных и очистных выработок. В нашем исследовании будут рассмотрены в основном крепи для подготовительных выработок.

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

По мере ухудшения горно-геологических условий (сочетаний напряжённо-деформированного состояния горного массива и физико-механических свойств горных пород) происходило усиление негативного влияния ПГД на состояние горных выработок.

Своды естественного равновесия в кровле и почве горных выработок, возникающие в основном на «малых» глубинах разработки, повсеместно сменились обширными и неравномерно распределёнными вокруг выработок зонами запрещённых деформаций, что характерно для разрушения пород от сжатия на «больших» глубинах разработки [6].

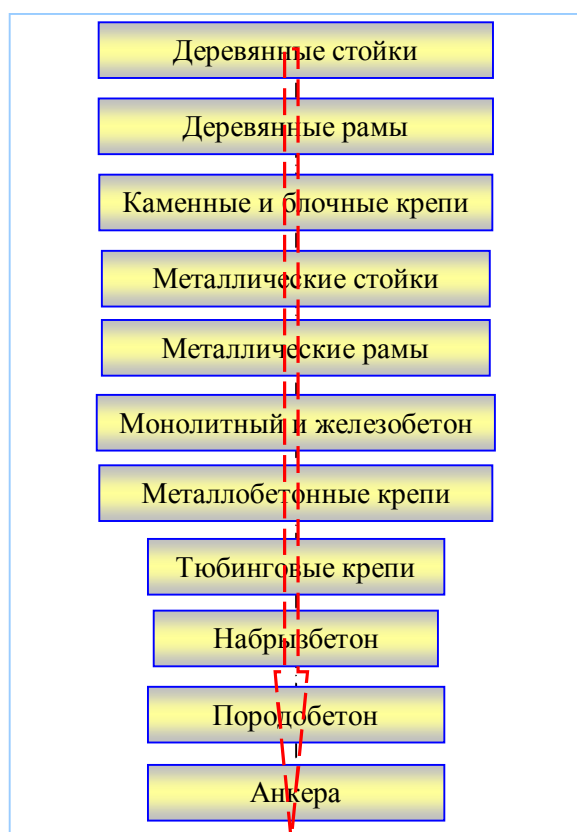


Рисунок 1 Этапы технической эволюции горной крепи в виде линейного графа

Поэтому конструкции крепи с жёстким режимом (заданных смещений) взаимодействия крепи с массивом горных пород были постепенно заменены на крепи с режимом заданных нагрузок, который требует перехода на податливые (адаптивные к смещениям) типы крепи.

Чтобы не прибегать к объёмному и кропотливому рассмотрению многочисленных типов крепи, удобнее рассмотреть более подробно лишь два наиболее показательных из них, которые отражают многие особенности развития остальных конструкций. Выделим для анализа среди множества крепей две базовых конструкции: стойку и анкер. Они расположены с противоположных концов вектора эволюции конструкций горной крепи — в его начале и в конце.

Исходя из общих положений диалектики, можно считать, что весь цикл исторического развития крепи прошёл по классиче-

скому принципу диалектической триады: «тезис-антитезис-синтез». Здесь в качестве *тезиса* условно можно считать начальный этап создания крепи (стойка), *антитезисом* — современный этап её развития в виде анкера, а *синтез* — как разрешение диалектических противоречий между ними. Поэтому «*синтез*» следует трактовать в форме появления новых конструкций крепи как «снятие» технических противоречий в этой области горной техники.

Стойка являет собой исторически первую крепь простейшей конструкции, тогда как анкер в определённом смысле замыкает современный этап развития технологии крепления.

Поучительно проследить сходство и отличия функциональных и конструктивных признаков таких, на первый взгляд, мало похожих типов крепи — рамной и анкерной (рис. 2 и 3).

Разумеется, существует большое разнообразие этих конструкций крепи, в том числе и комбинированных. Но во всех этих конструкциях стойки и анкера взаимодействуют с породным массивом в соответствии с присущими им различными закономерностями. Рамная крепь в качестве основного несущего конструктивного элемента использует шахтные стойки, а анкерная крепь — анкер. Остальные элементы крепи (межрамные ограждения, верхняки, штрипсы и т. д.) выполняют вспомогательные функции. Поэтому мы сосредоточим своё внимание на основных грузонесущих элементах крепи — стойке и анкере.

Стойка является простейшей и самой доступной конструкцией крепи, она положила начало развитию этого направления горной техники и технологии. Исторически появление стойки как элемента крепи заставило практиков приспособлять её к различным условиям, в которых находились горные выработки. Постепенно стойка получила развитие путём усложнения конструкций с целью обеспечения безопасности ведения горных работ. Необходимость ограждения породного контура

выработки от падения вывалов и породных обломков обусловило появление рамных, а в дальнейшем и сплошных конструкций крепи. Анкер, в свою очередь, является как бы антиподом стойке и оказался на завершающем этапе эволюции крепи, в нём получили применение новые горные технологии и материалы (бурение, химические растворы, высокопрочные стали и пр.). Тем не менее обе сравниваемые конструкции, несмотря на принципиальные различия, имеют много общего.

С этой целью выделим общие признаки, присущие стойке и анкеру:

1. Одинаковый способ взаимодействия с массивом путём создания отпора в виде сосредоточенной силы, приложенной в точке к породному контуру непосредственно или через дополнительные элементы.

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

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

4. В условиях больших смещений породного контура, при образовании зоны запредельных деформаций вокруг выработки, крепи необходимо обеспечить податливый режим работы.

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

Полезно рассмотреть и важные отличия стойки и анкера, чтобы выделить их как этапы эволюции крепи:

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

2. Стойка всегда располагается внутри горной выработки и имеет два контакта на породном контуре, а анкер, напротив, раз-

мещён в окружающем массиве горных пород с одним контактном участком на контуре выработки, поэтому условно можно считать, что по воздействию на породный контур одна стойка конструктивно равна двум анкерам.

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



Рисунок 2 Простейшая деревянная крепь «две стойки под распил» при потере устойчивости стоек



Рисунок 3 Буроинъекционные анкера ГЕОКРЕП

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

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

Переход горных работ на всё большие глубины разработки вызвал кардинальную смену парадигмы методов управления ПГД. Принципиально изменились законы и форма ПГД: первая фундаментальная закономерность (I-ФЗ) ПГД сменилась на вторую (II-ФЗ). Это значит, что разрушение пород вокруг выработок напряжениями растяжения заместилось разрушением от сжимающих напряжений. Вывалы и своды естественного равновесия (СЕР) были вытеснены разнообразными формами зон запредельных деформаций (ЗЗД) вокруг выработки, что сопровождалось значительными смещениями, неравномерным нагружением крепи, выдавливанием и обрушениями пород в выработку [6].

Кардинальная смена форм ПГД заставила горных инженеров пойти по пути создания криволинейных и даже замкнутых мощных грузонесущих конструкций крепи для капитальных выработок (блочные, монолитные, металлобетонные, тубинговые и породонесущие конструкции). Для подготовительных и вспомогательных выработок развитие крепи пошло по принципиально иному направлению, основанному на создании не жёстких, а податливых рамных, анкерных и смешанных конструкций. Именно это направление оказалось самым плодотворным и эффективным.

3 Разработка и обоснование основных требований к горной крепи

Кратко рассмотрим основные требования, которым должны отвечать горные

крепь как типичные представители горной техники. Обычно требования к сравниваемым промышленным объектам подразделяются на технические, эксплуатационные и экономические, причём их выбор и формулирование сводится к нередко формальному и мало систематизированному набору общих показателей.

Опираясь на рекомендации работы [7], для проведения сравнительной оценки технического уровня образцов горной техники необходимо использовать комплекс показателей, позволяющих сопоставить её эффективность по различным характеристикам, которые можно разбить на несколько групп:

- габаритные размеры и другие геометрические параметры горной машины и отдельных её элементов;
- показатели условий применения техники (горно-геологические и горно-технические данные);
- энерго-механические параметры (тип энергии, установленная мощность двигателей на исполнительном органе, на погрузке, движителе, КПД и т. д.);
- показатели технической и эксплуатационной производительности, надёжность, коэффициент готовности;
- технические параметры отдельных систем и условий их эксплуатации;
- требования безопасности, комфортности, охраны труда;
- технико-экономические данные (стоимость, окупаемость, ремонтпригодность и пр.).

Целесообразно конкретизировать эти общие показатели и сосредоточиться на технических требованиях, предопределяющих особенности конструктивных решений крепи, при одновременном максимальном удовлетворении эксплуатационных условий их использования.

Требования к горным крепям, помимо известных общетехнических и экономических, следует сформулировать главным образом на основе особенностей функционального их использования в качестве самостоятельного или конструктивного эле-

мента поддержания горной выработки. А такое использование предполагает в первую очередь контактное взаимодействие крепи с породным контуром, что предопределяет наиболее важные требования к ней, формирующие силовое и деформационное взаимодействие с массивом горных пород.

Условия силового взаимодействия с породным массивом порождают следующие технические требования:

- 1) высокая грузонесущая способность;
- 2) рабочее сопротивление конструкции должно быть близким к предельной несущей способности крепи;
- 3) возможность предварительного (начального) распора и обеспечение его максимального значения;
- 4) минимизация концентрации напряжений на участке контакта крепи (например, концов стойки) с массивом горных пород;
- 5) быстрый набор рабочего сопротивления при нагрузке со стороны пород;
- 6) простая и удобная разгрузка крепи от внешнего давления при её извлечении;
- 7) возможность контроля усилий на контакте «крепь-массив» и управления ими.

Для обеспечения деформационного взаимодействия с массивом горных пород, крепи должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обеспечивать максимально возможную раздвижность при установке, т.е. нужный запас податливости;
- 2) иметь плавную, без рывков податливость под действием нагрузки, когда она превысит уровень рабочего сопротивления;
- 3) при исчерпании запаса податливости переходить в жёсткий режим работы с предельным усилием отпора;
- 4) сохранять продольную устойчивость сжатых элементов (стоек, стен) под нагрузкой;
- 5) не деформировать (сминать или раздавливать) породы на контакте с опорами.

Сформулированные требования относятся лишь к деформационно-силовым характеристикам крепи, которые отражают эксплуатационно-функциональные особен-

ности её работы при взаимодействии с породным массивом. Эти требования не являются исчерпывающими и нуждаются в дополнении технико-экономическими показателями для полноты рассмотрения и достоверного суждения при сравнении и выборе возможных конструкций крепи.

Исходя из требований по соблюдению деформационно-силовых характеристик, можно перейти к формулированию критериев эффективности горной крепи.

4 Требования к критериям оценки эффективности горной крепи

Чтобы получить объективные критерии эффективности, следует их формировать в виде безразмерных симплексов с использованием лишь самых важных показателей. Учитывая недостаточно достоверный характер, либо отсутствие некоторых исходных технических данных в доступной для анализа текущей информации, желательно выбрать такие комбинации показателей, которые охватывают как можно более стабильные и распространённые свойства конструкции.

К техническим данным, чаще всего приводимым в технических характеристиках горной крепи, можно отнести (в скобках указаны обозначения размерности [L] — длина; [t] — время; [m] — масса; [F] — сила):

- A — габаритные размеры (длина, ширина, высота), м, [L];
- V — условный объём крепи, м³, [L³];
- M — масса данного образца крепи (т), [m];
- γ — плотность материала крепи, кг/м³, [m/L³];
- F — рабочее сопротивление (грузонесущая способность) крепи, Н;
- U — конструктивная податливость в направлении преобладающей нагрузки со стороны пород, м.

Эти параметры подлежат уточнению для каждого типа крепи. Так, например, для шахтных стоек определяющим линейным размером будет их максимальная длина **L**, а для рамной или сплошной крепи — размер

выработки в направлении максимальных нагрузок. Массу крепи следует относить либо к отдельному конструктивному её элементу (стойка, крепёжная рама), либо для сплошных конструкций — массу, приходящуюся на 1 м длины выработки.

К одному из основных требований при формировании критериев относится их неизменность (инвариантность) в отношении «масштабного» фактора. Под «масштабным» фактором понимается изменение численной величины любого из показателей при пропорциональном изменении размеров конструкции. При этом, как правило, таких критериев может быть несколько, поэтому поставленная задача выбора эффективной крепи относится к многокритериальному классу.

Будем опираться на результаты работы [7], где приведена общая методика построения критериев для сравнительной оценки уровня эффективности горной техники и технологии. Согласно этой методике, вначале следует выделить наиболее значимые технические показатели крепи, которые определяют эффективность её применения. К таким результативным показателям для деформационно-силовых свойств крепи следует отнести:

- предельную несущую способность P (кН) и рабочее сопротивление F (кН);
- определяющие крепь геометрические размеры: длину L (м) и конструктивную податливость («раздвижность») U (м);
- полную массу крепи M (кг).

Из совокупности наиболее достоверных данных желательно получить некоторые критерии (показатели), которые условно можно использовать для сравнительной оценки разных типов крепи.

Всегда возможно для единообразия так сформировать эти показатели, чтобы они при своём возрастании указывали на повышение технических качеств объекта изучения. Иными словами, когда первая производная от выбранного результативного показателя по времени положительна, это отражает положительную тенденцию.

Кроме того, как это отмечалось выше, изменение масштаба любого вида техники не должно приводить к заметному изменению значения показателя.

Независимо от способа формирования набор показателей (критериев) в многокритериальной задаче должен удовлетворять определённым требованиям [7]:

- **Полнота.** Использование любых дополнительных критериев не изменяет результатов решения задачи.

- **Декомпозируемость.** Набор критериев обеспечивает возможность разбиения сложной задачи на отдельные, более простые части.

- **Неизбыточность.** Различные показатели (критерии) не должны учитывать один и тот же аспект последствий.

- **Минимальность.** Набор должен содержать как можно меньшее количество критериев.

- **Измеримость.** Каждый критерий должен допускать возможность оценки интенсивности характеризуемого им свойства.

Используя основные положения теории подобия и размерностей, можно предложить несколько основных критериев технической эффективности крепи.

5 Коэффициент конструктивного качества материала крепи

В первую очередь желательно учесть влияние на оценку конструктивных параметров крепи свойств материала — его прочности и плотности — с тем, чтобы можно было сравнивать конструкции крепи из разных материалов.

Для этого следует воспользоваться коэффициентом конструктивного качества материала k_M [1] в виде отношения несущей способности условного куба данного материала с ребром 1 м к его массе:

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

где $[\sigma]$ — предел прочности материала крепи на один из видов нормативных на-

грузок (одноосное сжатие или растяжение, изгиб и др.), действующих на крепь, кПа;
 γ — плотность материала крепи, кг/м³;

$A_1 = 1$ — площадь грани условного единичного куба, м²;

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

Таким образом, коэффициент конструктивного качества материала k_M показывает, какую прочность может обеспечить его масса, сосредоточенная в единице объёма, а размерность его равна кН/кг.

Значения коэффициентов конструктивного качества для разных материалов приведены в таблице 1 в порядке убывания коэффициента k_M при сжатии. Расчёты проведены по данным справочника для крепления и могут колебаться в пределах $\pm 20\text{--}30\%$, что позволяет вполне надёжно выделить главные тенденции.

Довольно неожиданным оказалось, что на сжатие наилучшими материалами являются сосна (позиция 2) и дуб (позиция 3), пропустив на первое место только высокопрочную легированную сталь 30ХГС с коэффициентом качества $k_M = 14$ кН/кг, одинаковым для растяжения и сжатия. Обычные стали Ст3 и Ст5 (позиции 4 и 5 в таблице 1) с $k_M = 4,8$ и $6,4$ кН/кг уступили по конструктивному качеству дубу и сосне с коэффициентами соответственно $k_M = 6,5$ и $6,7$ кН/кг.

Самый низкий ранг по качеству при сжатии имеют набрызгбетон (поз. 6) и бетон (поз. 7) с соответствующими коэффициентами $k_M = 2,3$ и $1,4$ кН/кг, т. е. на порядок меньше, чем дерево.

Более наглядно сравнение материалов по их коэффициентам конструктивного качества k_M можно проследить по гистограммам на рисунке 4.

Из полученных данных следует, что при ранжировании материалов по убыванию значений k_M при сжатии они расположились по номерам, приведённым в таблице 1.

Таблица 1
Коэффициенты конструктивного качества k_M
для разных материалов крепи

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

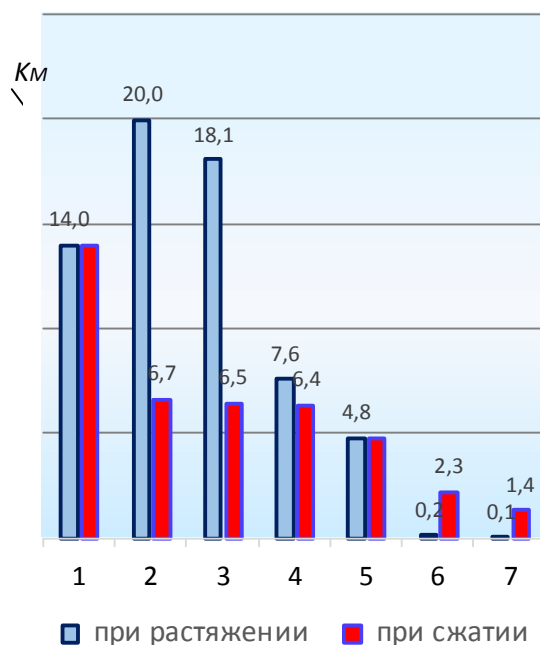


Рисунок 4 Гистограмма коэффициентов конструктивного качества различных материалов крепи (согласно табл. 1) при их растяжении и сжатии

При сравнении материалов по коэффициенту конструктивного качества k_M при растяжении максимум имеют сосна (п. 2), у которой $k_M = 20$ кН/кг и дуб (п. 3) со значением $k_M = 18$ кН/кг. Далее по убыванию следуют

стали (ранжированные места 4, 5), а в самом конце наихудшие показатели у набрызгбетона (п. 6) и бетона (п. 7) с коэффициентами качества соответственно $k_M = 0,2$ и $0,1$ кН/кг.

Итак, деревянные материалы крепи (сосна и дуб) оказались явными фаворитами по сравнению с другими материалами по растяжению и примерно сопоставимы со сталью при сопротивлении сжимающим нагрузкам. Однако следует иметь в виду, что в крепях деревянные материалы используются именно в сжатых элементах (стойки), где их преимущества при нагрузках на растяжение нивелируются. Кроме того, для капитальных выработок дерево как материал крепи ограничено иными негативными показателями (пожароопасность, малый срок службы, плохая сочетаемость с другими материалами и др.).

Коэффициент конструктивного качества материала k_M , как следует из его определения, имеет размерность кН/кг и не является нормированным, и он удовлетворяет только условию в виде неравенства $k_M > 0$. Тем не менее он полезен для построения критериев эффективности крепи и будет там использован.

6 Обоснование критериев технической эффективности горной крепи

Геомеханические показатели крепи для отражения особенностей её взаимодействия с массивом горных пород полностью описываются её деформационно-силовой характеристикой в виде некоторой функциональной зависимости, которую можно представить в общем виде как

$$f(F, U, t) = 0, \quad (2)$$

где $U(t)$ — конструктивная податливость крепи (смещения грузонесущих её элементов в направлении действия нагрузки), м;

$F(t)$ — грузонесущая способность крепи, кН;

t — текущее время взаимодействия крепи с окружающим породным массивом при её эксплуатации, с.

Как видим, деформационно-силовые параметры крепи явным или неявным образом существенно зависят от времени t . Это намного усложняет решение основной геомеханической задачи о выборе крепи и обоснование её геомеханических параметров $U(t)$ и $F(t)$.

Заметно упростить решение этой задачи по креплению горных выработок способны критерии технической эффективности крепи. Такие критерии могут наиболее полно отражать силовые $F(t)$ и деформационные $U(t)$ результативные показатели крепи.

Используя основные положения теории подобия и размерностей, как правило, можно предложить несколько критериев технической эффективности. При этом желательно обеспечить условие нормировки, когда у каждого из критериев диапазон возможного изменения заключён в пределах от -1 до 1 . Или, когда показатели по физическому смыслу не принимают отрицательных значений, критерий должен быть в пределах от 0 до 100% , что по смыслу равноценно, но более удобно для сравнения. В результате получим так называемые нормированные критерии технической эффективности — **НКТЭ**. После этих общих требований перейдём к выбору и обоснованию НКТЭ конкретно для горной крепи.

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

$$K_{Di} = k_n \frac{U_i}{L_i} \cdot 100\%, \quad (3)$$

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

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

k_n — нормирующий множитель, $k_n = 2$.

Нормирующий множитель выбираем таким образом, чтобы искомый критерий эффективности всегда удовлетворял неравенству $0 \leq K_{Di} \leq 100\%$. Обычно податливость конструктивно реализуется путём раздвижности элемента крепи, поэтому всегда размер выработки L_i или полная длина элемента больше его одинарной раздвижности U_i не менее чем в два раза, а для двойной раздвижности — в три раза; соответственно, нормирующие множители будут равны $k_n = 2$ и $k_n = 1,5$.

Очевидно, для жёстких конструкций крепи, у которых конструктивная податливость, если пренебречь упругими их деформациями, равна $U_i = 0$, деформационный критерий принимает, согласно (1), минимальное значение $K_D = 0$. Максимальным значением деформационного НКТЭ будут обладать податливые крепи типа стоек трения или гидростоек, у которых он доходит до $K_D = 80\%$ и более.

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

$$K_D = 2 \frac{U}{L} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Для критериальной оценки силовых показателей крепи при её взаимодействии с массивом горных пород введём силовой критерий эффективности K_F , по аналогии с коэффициентом конструктивного качества материала k_M , в виде

$$K_F = k_n \frac{F_k}{M_k}, \quad (5)$$

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

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

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

Полная определённость при выборе грузонесущей способности F_k существует только для крепей, обладающих точечным контактом с породным массивом: стойки и анкера. У всех остальных конструкций крепи (рамных и сплошных) грузонесущая способность может изменяться в разы в зависимости от условий контакта с породой и закона распределения внешней нагрузки. Ввиду этого чаще всего используют данные технического паспорта, полученные для идеализированных горно-геологических условий и полного соблюдения ТУ изготовления, технологии возведения и эксплуатации крепи.

Особо остановимся на выборе нормирующего множителя k_n . Если внимательно изучить структуру формулы (5), станет понятным её физический смысл: критерий показывает, какую часть грузонесущей способности (рабочего сопротивления) приходится на единицу массы крепи. Совершенно очевидно подобие предложенного критерия по своему смыслу, структуре и размерности коэффициенту конструктивного качества материала k_M из формулы (1). Также понятно, что, исходя из физического смысла выражений (1) и (5), всегда соблюдается неравенство $k_M \geq K_F$. Поэтому естественным образом вытекает выражение для нормирующего множителя k_n , который следует принять равным

$$k_n = \frac{1}{k_M} = \frac{\gamma}{[\sigma]}, \quad (6)$$

что после подстановки в (5) даёт окончательную формулу для искомого силового критерия, выраженную в %:

$$K_F = \frac{\gamma \cdot F_k}{[\sigma] \cdot M_k} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где γ — плотность материала крепи, кг/м³;

F_k — рабочее сопротивление (реакция) крепи, кН;

M — масса крепи или её элемента, кг;

$[\sigma]$ — допустимое напряжение материала крепи с учётом характера преобладающих предельных напряжений (на растяжение, сжатие, изгиб), кН/м².

Нетрудно убедиться, что силовой критерий технической эффективности K_F является безразмерным и отвечает требованиям нормировки, т. е. всегда находится в пределах $0 \leq K_F \leq 100 \%$.

Подобного типа критериями можно оценить техническую эффективность крепи или отдельных её элементов в зависимости от времени в разные периоды её эксплуатации.

Важно, помимо частных критериев деформационно-силовых показателей крепей, сопоставить работоспособность всей конструкции в процессе взаимодействия с породным массивом.

Работоспособность крепи отражает ту работу, которая затрачивается горным массивом при нагружении и деформации крепи и может быть определена из выражения

$$W(t) = \int_{U_0}^{U(t)} F_k(\xi, t) \cdot d\xi, \quad (8)$$

где $W(t)$ — работа, затраченная на деформирование конструкции крепи, Нм;

$F_k(\xi, t)$ — переменная во времени нагрузка на крепь со стороны породного массива, в общем случае зависящая и от деформаций контура крепи ξ , кН;

$U(t)$ и U_0 — начальное (при $t = 0$) и конечное ($t > 0$) смещения крепи.

Если $F_k(\xi, t) = \text{Const}$, что наблюдается у идеально податливых конструкций, формула (8) значительно упрощается:

$$W(t) = F_k \cdot [U(t) - U_0]. \quad (9)$$

Нетрудно, повторяя предыдущие рассуждения, показать, что НКТЭ для оценки работоспособности крепи можно получить из равенств (4) и (7) путём «свёртки» этих двух взаимно дополняющих друг друга НКТЭ — силового K_F и деформационного K_D критериев:

$$K_W = K_F \cdot K_D = 2 \frac{\gamma \cdot F_k}{[\sigma] \cdot M_k} \cdot \frac{U}{L} \cdot 100\%. \quad (10)$$

Критерии могут получить и иную, более доступную для понимания интерпретацию как своего рода коэффициенты полезного действия по каждому из свойств. Так, силовой критерий K_F показывает, насколько эффективно используются прочностные свойства материала, из которого изготовлена крепь. Деформационный критерий K_D отражает адаптивные возможности крепи при её смещениях по сравнению с идеальной податливостью. И, наконец, критерий работоспособности K_W указывает на КПД (долю возможной работы) конструкции в процессе взаимодействия с породным массивом.

Какими НКТЭ обладают известные типы крепи, можно проследить по данным таблицы 2. Диапазон допустимого изменения каждого из критериев от 0 до 100 %. В таблице крепи ранжированы по степени возрастания результирующего критерия — НКТЭ работоспособности крепи K_W .

Исходные данные для взятых в качестве примера типов крепи были получены из технической и справочной документации. Они в целом хотя и достаточно достоверны, но всё же имеют оценочный характер, и поэтому результаты расчётов по формулам (4), (7) и (10) могут колебаться в пределах $\pm 20 \%$. Более того, при расчётах силового критерия эффективности по формуле (7) рабочее сопротивление крепи либо назначалось согласно её паспортным данным (например, для стоек), либо для рамных конструкций крепи при идеальном их нагружении со стороны массива — равномерно распределённой нагрузкой.

Отметим, что если нагрузка на крепь будет иного распределения, рабочее сопротивление рамной крепи снизится в 5–10 раз, что показано в работе [6].

В таблице 2 (выделены min и max значения) рассчитаны критерии НКТЭ для шахтных стоек разных типов, рамных деревянной и стальной крепи, а также анкера и посадочной крепи «Спутник». Для всех иных конструкций крепи определение их критериев технической эффективности не представляет сложности, и таблица 2 может быть при необходимости дополнена. Более того, на основе разработанного метода представляется возможным оценить эффективность конструкторских решений при проектировании иных строительных сооружений и их элементов (колонны, балки, фундаменты и др.).

Таблица 2
Критерии НКТЭ шахтных крепей

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

Как видно из таблицы 2, наиболее эффективна по силовому критерию анкерная крепь $K_F=63\%$, т. к. она достигает более чем половины значения коэффициента конструктивного качества материала, из которого она изготовлена. Ни одна из существующих конструкций крепи не смогла хотя бы наполовину приблизиться к показателю анкера по силовому критерию $K_F=60\text{--}70\%$, оставаясь в пределах 0...25 %. Худшими по силовому критерию K_F оказались рамные деревянная и стальная крепи, что обусловлено неравнопрочностью конструкции. Последняя неизбежна из-за низкой грузонесущей способности самого ответственного элемента — верхняка, работающего на продольно-поперечный изгиб.

Деформационные свойства крепей, представленные критерием K_D , различаются столь же разительно: от 10 до 80 %. Лучшими деформационными критериями (до 80 %) обладают стойки трения и некоторые гидростойки, в которых практически до предела использован возможный запас раздвижности. В разы хуже критерий K_D у крепей с малой конструктивной податливостью — это рамная деревянная крепь (10–15 %) и стальная крепь из спецпрофиля (в пределах 25–30 %).

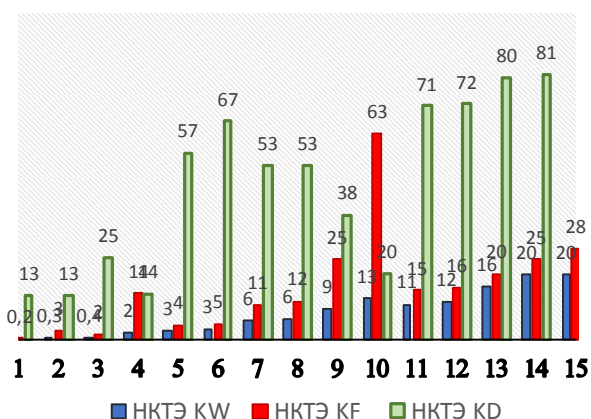


Рисунок 5 Гистограмма НКТЭ
(по оси абсцисс расположены номера типов крепи согласно таблице 2)

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

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

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

Таким образом, имеются большие потенциальные резервы в развитии таких горных крепей — самых распространённых при подземных горных работах. Модернизация этих крепей должна быть направлена на устранение присущих им и количественно оценённых техническими критериями недостатков: для стоек — значительное повышение силового критерия путём создания новых узлов податливости с высоким сопротивлением, а для анкеров — изменение конструкции в направ-

лении существенного повышения податливости.

Сопоставление особенностей работы и соответствующих критериев технической эффективности стоечной и анкерной крепи явно показывает реализацию диалектического закона «отрицание отрицания» [8]. Мы видим переход исходного тезиса (стойка) в антитезис (анкер), и далее должен последовать синтез — появление новой конструкции крепи.

Таким образом, научно обосновывается прогноз эволюции развития конструкций горной крепи как сочетание наиболее удачных показателей стоечной и анкерной конструкций в направлении достижения их высоких деформационно-силовых критериев. Назовём условно такую новую конструкцию крепи стоечно-анкерной, при этом в ней следует избегать элементов, работающих на изгиб, у которых низкие критерии технической эффективности. Отметим и важные выводы, которые следует сделать относительно формы пластовых подготовительных выработок, особенно в зоне вредного влияния очистных работ.

Новый тип стоечно-анкерной крепи потребует отказа, во-первых, от рамных крепей с применением спецпрофиля и, во-вторых, повсеместного перехода от арочной формы выработок к прямоугольной, что резко снизит производственные затраты и повысит безопасность горных работ.

Исследования в этом направлении будут изложены в дальнейших публикациях.

Выводы

Нормированные критерии технической эффективности (НКТЭ) дают научно обоснованную базу для объективного сравнения различных образцов горной техники и крепи в частности, что важно на всех этапах её создания, проектирования, изготовления и эксплуатации.

В частности, в результате выполненных исследований:

1) впервые рассмотрена эволюция развития горной крепи с диалектических позиций;

2) сформулированы требования к горной крепи с позиций особенностей взаимодействия её с массивом горных пород;

3) изучены коэффициенты k_M конструктивного качества материалов крепи;

4) впервые предложены критериальные требования и обоснованы значения нормированных критериев технической эффективности горной крепи (деформационный K_D , силовой K_F и работоспособности K_W);

5) впервые для крепей различных типов рассчитаны НКТЭ и выполнен их сопоставительный анализ;

6) на базе диалектической триады дан научно обоснованный прогноз эволюции развития конструкций горной крепи для подготовительных горных выработок.

Выполненные исследования могут быть положены в основу принятия решений при проектировании крепи и при разработке новых её конструкций с учётом закономерностей проявлений горного давления и взаимодействия крепи с окружающим массивом. Основные выводы будут также полезны при подготовке инженеров и аспирантов горных специальностей.

Библиографический список

1. Каретников, В. Н. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок [Текст] : справочник / В. Н. Каретников, В. П. Клейменов, А. Г. Нурдихин. — М. : Недра, 1989. — 571 с.
2. Jovanovic, P. Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorija / Petar Jovanovic // Rudarsko-geoloski fakultet Univerziteta u Beogradu. (Rudarstvo). — 1994. — Kn. 1, 2, 3. — 518 s.
3. Баклашов, И. В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей [Текст] : учебник для вузов / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. — [3-е изд., стер.]. — М. : Студент, 2012. — 543 с.
4. Tajduś, A. Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projectowanie i budowa tuneli [Text] / Antoni Tajduś, Marek Gała, Krzysztof Tajduś. — Krakow : Akademia AGH, 2012. — 762 s.
5. Литвинский, Г. Г. Стальная крепь горных выработок [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Киев : Техника, 1999. — 216 с.
6. Литвинский, Г. Г. Горное давление на малых и больших глубинах разработки [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — № 37. — С. 5–19.
7. Литвинский, Г. Г. Критерии оценки технического уровня горной техники [Текст] / Г. Г. Литвинский // Уголь Украины. — 2015. — № 9. — С. 41–46.
8. Гегель, Г. В. Ф. Наука логики. В 3-х томах / Г. В. Ф. Гегель. — М. : Мысль, 1972. — 371 с.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СПСиШ ДонНТУ Борщевским С. В., к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Мележиком А. И.

Статья поступила в редакцию 26.09.19.

проф. Литвинський Г. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, ligag@ya.ru)

ГІРСЬКЕ КРІПЛЕННЯ: ЕВОЛЮЦІЯ РОЗВИТКУ І КРИТЕРІЇ ТЕХНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Дано стислий аналіз існуючих конструкцій гірського кріплення. Показано діалектику його еволюції і простежено тенденції розвитку. Сформульовано основні технічні вимоги до деформаційно-силових показників кріплення. Обґрунтовано нормовані критерії його ефективності та працездатності. Проведено чисельне порівняння ефективності різного кріплення, виконано аналіз і прогноз еволюції його розвитку.

Ключові слова: гірничавиробка, гірничекріплення, діалектика еволюції кріплення, вимоги до кріплення; деформаційно-силові показники; коефіцієнт якості матеріалу кріплення; критерії ефективності та працездатності, порівняння кріплення, прогноз розвитку.

Prof. Litvinsky G. G. (*DonSTU, Alchevsk, LPR, ligag@ya.ru*)

MINE SUPPORT: EVOLUTION OF DEVELOPMENT AND CRITERIA OF TECHNICAL EFFICIENCY

A brief analysis of the existing mine support structures is given. The dialectic of its evolution is shown and development trends are traced. The basic technical requirements for the deformation-force indicators of mine support are formulated. The normalized criteria for its effectiveness and efficiency are proved. A numerical comparison of the effectiveness of different linings was carried out, an analysis and forecast of their evolution was done.

Key words: *excavation, mine support, dialectic of lining evolution, requirements to lining; deformation-force indicators; quality factor of lining material; criteria of effectiveness and efficiency, comparison of linings, prediction of development.*

УДК 622.834

к.т.н. Ларченко В. Г.,
Коваленко Е. В.,
Маталкина Ю. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ОЖИДАЕМЫХ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ

Приведена скорректированная методика расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности в главных сечениях мульды при добыче угля подземным способом.

Ключевые слова: расчёт сдвижений и деформаций земной поверхности, скорректированная методика, подземная разработка угольных пластов, граничные углы.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Маркшейдерская служба шахт несёт ответственность за безопасную подработку инженерных сооружений, коммуникаций и природных объектов, за выбор оптимальных мер их охраны, основой которых являются максимальные ожидаемые или вероятные сдвижения и деформации земной поверхности. Предварительно определить последние можно расчётом по методикам отраслевых стандартов Украины [1] или РФ [2], где основным параметром является максимальное оседание η_m , вычисляемое с 1972 года по нормативным документам [1–4] по одной и той же формуле. Выполненные исследования [5–7] показали (табл. 1, рис. 1), что при постоянных отношениях размеров выработанного пространства D к глубине подработки H и полной подработке в горно-геологических условиях ($\frac{D_2}{H} = 1, 2, \dots, m = 1 \text{ м}, \alpha = 5^\circ, D_I = 2000 \text{ м}, \frac{l}{H} \geq 0,8, \frac{h}{H} \leq 0,3$) η_m возрастает с увеличением H от 100 до 1000 м, а при дальнейшем возрастании H η_m остаётся постоянной величиной, то есть не зависит от H . При отношении размеров целика l у соответствующей границы к H , равном 0,4 (в районах кроме разработки антрацита), η_m не зависит от H при её увеличении от 100 до 1600 м (рис. 1, прямая 4), что противоречит основным положениям геомеханики и сдвижения сло-

стой толщи горных пород и указывает на необходимость корректировки методики расчёта ожидаемых и вероятных сдвижений и деформаций земной поверхности, а это является актуальной научной и практической задачей угольной отрасли.

Постановка задачи. Задачей данного этапа исследований является корректировка методики расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности в главных сечениях мульды.

Изложение материала и его результаты. На параметры процесса сдвижений и деформаций земной поверхности влияет более 10 факторов. Глубина очистных работ и литология толщи пород являются одними из главных. Они учитывались при расчётах максимальных оседаний в нормативных документах [1–4] коэффициентами N_1, N_2 и относительной величиной q_0 , подтверждены натурными наблюдениями, в основном при H до 600 м, но, как показывают исследования [5–7], при больших глубинах её влияние на параметры сдвижений и деформаций подработанного массива горных пород не является достаточным.

Поэтому целью данного этапа исследований является корректировка методик расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности [1, 2] в главных сечениях мульды, так как на многих шахтах Донбасса уголь добывают на глубинах более 1000 м, а влияние H на η_m учтено недостаточно (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1
Максимальные оседания и деформации земной поверхности при различных H по методике [1]

$H, \text{ м}$	$\eta_m, \text{ м}$		$L_3, \text{ м}$	$i_m \cdot 10^{-3}$	$\varepsilon_m \cdot 10^{-3}$
	$\frac{l}{H} > 0,8$	$\frac{l}{H} = 0,4$			
100	0,741	0,798	106,4	14,2	-6,7
200	0,742	0,798	212,8	7,10	-3,4
300	0,749	0,798	319,2	4,80	-2,3
400	0,757	0,798	425,5	3,72	-1,79
500	0,764	0,798	532	3,03	-1,47
600	0,771	0,798	638,4	2,58	-1,25
700	0,779	0,798	744,8	2,27	-1,09
800	0,786	0,798	851,2	2,01	-0,98
900	0,794	0,798	957,6	1,82	-0,90
1000	0,797	0,798	1064	1,65	-0,82
1100	0,798	0,798	1170,4	1,50	-0,74
1200	0,798	0,798	1276,8	1,37	-0,68
1300	0,798	0,798	1383,2	1,27	-0,63
1400	0,798	0,798	1489,5	1,18	-0,59
1500	0,798	0,798	1596	1,10	-0,55
1600	0,798	0,798	1702,4	1,0	-0,51

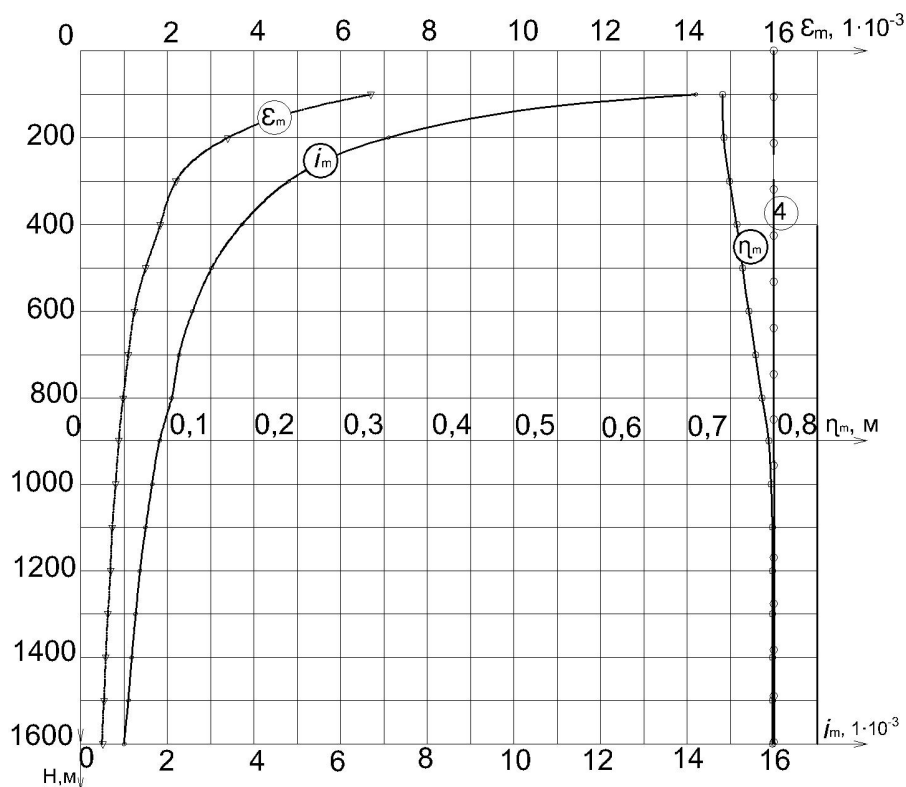


Рисунок 1 Графики зависимости максимальных оседаний η_m , наклонов i_m и горизонтальных деформаций ε_m земной поверхности от H по методике [1] при $\frac{D_2}{H} = 1,2$, $q_0 = 0,8$, $\frac{l}{H} \geq 0,8$

Исследования выполнялись методами натурных наблюдений [8–10], физическим и математическим моделированием методом конечных элементов [11], теоретическим [5–7].

Рекомендуем расчёт сдвижений и деформаций земной поверхности выполнять по скорректированным формулам (1–13):

1) максимальное оседание:

$$\eta_m = q_0 \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2 - K_p \cdot H^2, \text{ м}; \quad (1)$$

2) сдвижения и деформации в точках главных сечений мулды сдвижения:

– оседание:

$$\eta_{x,y} = \eta_m \cdot S(Z_{x,y}), \text{ м}; \quad (2)$$

– наклоны:

вкрест простирания

$$i_y = \frac{\eta_m}{L_{1(2)}} \cdot S'(Z_y), \quad (3)$$

по простиранию

$$i_x = \frac{\eta_m}{L_3} \cdot S'(Z_x); \quad (4)$$

– кривизна:

вкрест простирания

$$k_y = \frac{\eta_m}{L_{1(2)}^2} \cdot S''(Z_y), \quad (5)$$

по простиранию

$$k_x = \frac{\eta_m}{L_3^2} \cdot S''(Z_x); \quad (6)$$

– горизонтальные сдвижения:

по падению

$$\xi_{y1} = 0,5 \cdot a_0 \cdot \eta_m \left[S'(Z_{y1}) + 2BS(Z_{y1}) \right], \text{ м} \quad (7)$$

по восстанию

$$\xi_{y2} = -0,5 \cdot a_0 \cdot \eta_m \left[S'(Z_{y2}) - 2BS(Z_{y2}) \right], \text{ м} \quad (8)$$

по простиранию

$$\xi_x = 0,5 \cdot a_0 \cdot \eta_m \cdot S'(Z_x), \text{ м}, \quad (9)$$

$$B = \frac{1}{\alpha_0} \left(\operatorname{tg} \alpha - \frac{h + h_m}{H_{cp}} \right) \geq 0; \quad (10)$$

– горизонтальные деформации:

по падению

$$\varepsilon_{y1} = 0,5a_0 \frac{\eta_m}{L_1} \left[S''(Z_{y1}) + 2BS'(Z_{y1}) \right], \quad (11)$$

по восстанию

$$\varepsilon_{y2} = 0,5a_0 \frac{\eta_m}{L_2} \left[S''(Z_{y2}) - 2BS'(Z_{y2}) \right], \quad (12)$$

по простиранию

$$\varepsilon_x = 0,5a_0 \frac{\eta_m}{L_3} S''(Z_x), \quad (13)$$

где q_0 , a_0 — относительные величины максимального оседания и горизонтальных сдвижений, определяемые по таблице А-1 [1];

m — вынимаемая мощность пласта, м;

α — угол падения пласта, градус;

N_1 , N_2 — коэффициенты, характеризующие степень подработанности земной поверхности соответственно вкрест протирания и по простиранию, безразмерные величины, определяемые по формулам (14):

$$N_1 = \sqrt{0,9 \frac{D_1}{H}}; \quad N_2 = \sqrt{0,9 \frac{D_2}{H}}, \quad (14)$$

где D_1 , D_2 — суммарные длины смежных очистных выработок соответственно вкрест простирания и по простиранию пласта, м; H — средняя глубина разработки, м; K_p — коэффициент остаточных межслоевых расслоений (разуплотнений) подработанной толщи пород, зависящий от литологии массива, мощности, прочности и количества слоёв горных пород, предварительно установленный натурными наблюдениями [8, 9], теоретическими исследованиями [5–7, 11], моделированием на физических моделях и рекомендуемый на данном этапе при первичной подработке в антрацитовых районах Донбасса $K_p = 3 \cdot 10^{-7} \text{ 1/м}^2$, в остальных районах Восточного Донбасса $K_p = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/м}^2$ и требующий уточнения по результатам натурных наблюдений при подработке на больших глубинах;

$S(Z)$, $S'(Z)$, $S''(Z)$ — функции типовых кривых, определяемые для Донецкого бассейна по таблицам А.4–А.6 [1]; h — мощность наносов, м; h_m — мощность горизонтально залегающих мезозойских отложений; L_1 , L_2 , L_3 — длины полумульд, определяем по граничным углам и углу максимального оседания Θ при неполной подработке или по углам полных сдвижений ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 при полной подработке графически или аналитически, которые также считаем целесообразным корректировать при $H > 600$ м.

Функции типовых кривых $S(Z)$, $S'(Z)$, $S''(Z)$ логично принимать $Z = 1$ в точке максимального оседания при неполной подработке или в начале плоского дна при полной подработке, а $Z = 0$ определять по граничным углам β_0 , γ_0 , δ_0 , то есть считаем целесообразным развернуть на 180° оцифровку точек типовых кривых сдвижений и

деформаций на вертикальных разрезах в главных сечениях мульды и в таблицах.

Рекомендуемые в таблице 2 углы, вычисленные по арифметической прогрессии, косвенно учитывают прочность, слоистость толщи пород и глубину очистных работ, ограничивают прямолинейное увеличение длин полумульд на больших глубинах (табл. 3), форма зоны сдвижения очистной выработки в каменноугольных отложениях в главных сечениях мульды близка к эллипсоиду или усечённому эллипсоиду при наличии плоского дна (при $\frac{D}{H} \geq 1,2$), а определённые по приведённой методике параметры максимальных оседаний и деформаций земной поверхности в полумульде по простиранию пласта (табл. 3, рис. 2) и их зависимости от H близки к результатам натурных наблюдений [10], не противоречат теории прочности и сдвижения горных пород.

Таблица 2

Граничные углы, углы полных сдвижений и угол максимального оседания

Марка угля	Граничные углы			Угол максимального оседания Θ
	β_0	γ_0	δ_0	
А	$75^\circ - 0,8\alpha + H_\Gamma \cdot K_Y \geq 25^\circ$	$75^\circ + 0,2\alpha + H_\Gamma \cdot K_Y$	$75^\circ + H_\Gamma \cdot K_Y$	$90^\circ - 0,8\alpha + H_\Gamma \cdot K_Y$
	$70^\circ - 0,8\alpha + H_\Gamma \cdot K'_Y \geq 25^\circ$	$70^\circ + 0,2\alpha + H_\Gamma \cdot K'_Y$	$70^\circ + H_\Gamma \cdot K'_Y$	$90^\circ - 0,8\alpha + H_\Gamma \cdot K'_Y$
остальные марки	$72^\circ - 0,8\alpha + H_\Gamma \cdot K'_Y \geq 25^\circ$	$72^\circ + H_\Gamma \cdot K'_Y$	$72^\circ + H_\Gamma \cdot K'_Y$	$90^\circ - 0,8\alpha + H_\Gamma \cdot K'_Y$
	$70^\circ - 0,8\alpha + H_\Gamma \cdot K'_Y \geq 25^\circ$	$70^\circ + H_\Gamma \cdot K'_Y$	$70^\circ + H_\Gamma \cdot K'_Y$	$90^\circ - 0,8\alpha + H_\Gamma \cdot K'_Y$
Углы полных сдвижений				
	у нижней границы ψ_1	у верхней границы ψ_2	по простиранию ψ_3	
А	$55^\circ + H_\Gamma \cdot K_Y$	$55^\circ + 0,3\alpha + H_\Gamma \cdot K_Y$	$55^\circ + H_\Gamma \cdot K_Y$	
остальные марки	$55^\circ + H_\Gamma \cdot K'_Y$	$55^\circ + 0,3\alpha + H_\Gamma \cdot K'_Y$	$55^\circ + H_\Gamma \cdot K'_Y$	

Примечания:

1) в числителе приведены выражения для неподработанной толщи, в знаменателе — для подработанной;

2) $H_\Gamma = H_{cp} - 600$ м ≥ 0 ;

3) K_Y — коэффициент увеличения улов с возрастанием глубины (при $H > 600$ м): рекомендуемый в антрацитовых районах $K_Y = 0,015$ градус/м, при разработке других марок угля и в подработанном массиве $K'_Y = 0,01$ градус/м; требует дальнейшего подтверждения по результатам натурных наблюдений при выемке угля на глубинах более 600 м.

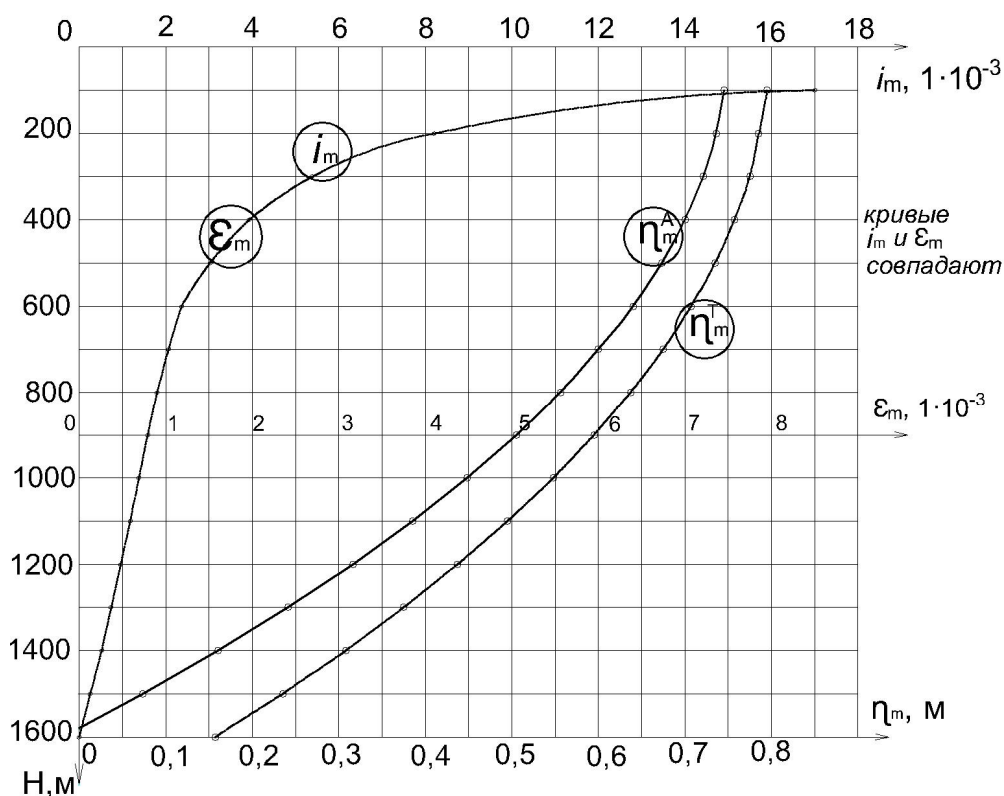


Рисунок 2 Кривые зависимостей η_m , i_m , ε_m от H при $t=1$ м, $\alpha=5^\circ$, $D_1=2000$ м, $\frac{D_2}{H}=1,2$

Таблица 3

Значения η_m , i_m , ε_m , вычисленные по формулам (2, 5, 9)

H , м	Ж-Т	Антрацит	Антрацит		
	η_m , м	η_m , м (нов.)	L_3 , м	i_m , $1 \cdot 10^{-3}$	ε_m $1 \cdot 10^{-3}$
100	0,795	0,745	96	17,1	8,5
200	0,785	0,736	195	8,29	4,1
300	0,775	0,721	293	5,41	2,69
400	0,757	0,700	390	3,95	1,96
500	0,735	0,673	488	3,03	1,51
600	0,707	0,640	590	2,36	1,18
700	0,675	0,601	640	2,06	1,03
800	0,637	0,556	675	1,80	0,90
900	0,595	0,505	700	1,59	0,79
1000	0,548	0,448	712	1,38	0,69
1100	0,495	0,385	715	1,18	0,59
1200	0,437	0,316	715	0,97	0,48
1300	0,375	0,241	703	0,75	0,37
1400	0,308	0,160	672	0,52	0,26
1500	0,235	0,073	633	0,25	0,13
1600	0,157	0	586	0	0

Условия применения приведённой методики расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности:

- отсутствие в зоне влияния тектонических нарушений;
- разрабатываемые пласты с углом падения не более 45°;
- исключение условий суммирования однозначных деформаций [8];
- отсутствие в подработанной толще крепких песчаников мощностью слоя более 25 м.

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Предложены скорректированная методика расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности в глав-

ных сечениях мульды сдвижения, скорректированные формулы определения граничных углов, углов полных сдвижений и максимального оседания.

2. Вычисленные по новой методике η_m , L_3 , i_m , ε_m (табл. 3, рис. 2) не противоречат основным положениям геомеханики и сдвижения подработанной толщи пород.

3. Дальнейшие исследования авторов будут направлены на уточнения коэффициентов K_P и K_Y по результатам натурных наблюдений, моделирования и теоретических исследований.

Библиографический список

1. ГСТУ 101.00159226.001-2003. Правила подработки зданий и сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом [Текст]. — Введ. 2003-10-28. — Киев : УкрНИМИ НАН Украины, 2004. — 128 с.
2. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях [Текст] : ПБ 07-269-98 : утв. Госгортехнадзором РФ 06.03.1998. — Введ. 1998-10-01. — Санкт-Петербург : Межотраслевой науч. Центр ВНИМИ, 1998. — 291 с.
3. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях [Текст] : утв. М-вом угольной промышленности СССР. — М. : Недра, 1981. — 288 с.
4. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в Донецком угольном бассейне [Текст] : утв. М-вом угольной промышленности СССР 21.02.1972. — М. : Типография ХОЗУ МУП СССР, 1972. — 133 с.
5. Ларченко, В. Г. Максимальные оседания и деформации земной поверхности при подработке на больших глубинах [Текст] / В. Г. Ларченко, Е. В. Коваленко, Ю. А. Маталкина // Сборник научных трудов ДонГТУ, 2018. — Вып. 11 (54). — С. 33–40.
6. Ларченко, В. Г. Исследование влияния глубины подработки на параметры процесса сдвижения земной поверхности [Текст] / В. Г. Ларченко, Ю. А. Маталкина // Сборник научных трудов ДонГТУ, 2017. — Вып. 7 (50). — С. 53–57.
7. Ларченко, В. Г. Влияние глубины разработки угольных пластов на окружающую среду [Текст] / В. Г. Ларченко, Е. В. Коваленко, Ю. А. Маталкина // Сборник трудов научной конференции. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — С. 57–66.
8. Ларченко, В. Г. Практические результаты исследований деформаций земной поверхности при отработке свиты пологих угольных пластов [Текст] / В. Г. Ларченко // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2009». — Днепропетровск : НГУ, 2009. — С. 222–230.
9. 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.
10. Посыльный, Ю. В. Максимальные оседания земной поверхности в антрацитовых районах Донбасса [Текст] / Ю. В. Посыльный, А. А. Джулай, Е. А. Тетерин // Перспективы развития Восточного Донбасса : сб. науч. трудов ШИЮРГТУ (НПИ). — Новочеркасск : Набл, 2007. — Вып. 4.2. — С. 282–294.

11. Ларченко, В. Г. Определение зависимости параметров сдвижений и деформаций подработанной толщи горных пород от определяющих факторов методом конечных элементов [Текст] / В. Г. Ларченко, О. А. Черных // Вестник МАНЭБ. — Санкт-Петербург, 2006. — № 22. — С. 16–24.

© Ларченко В. Г.

© Коваленко Е. В.

© Маталкина Ю. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.,
гл. маркшейдером шахты им. XIX съезда КПСС Трезневым Д. С.*

Статья поступила в редакцию 30.09.19.

к.т.н. Ларченко В. Г., Коваленко О. В., Маталкина Ю. А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ОЧІКУВАНИХ ЗРУШЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ВИДОБУТКУ ВУГІЛЛЯ

Наведено скориговану методику розрахунку очікуваних зрушень і деформацій земної поверхні в головних перетинах мюльди при видобутку вугілля підземним способом.

Ключові слова: розрахунок зрушень і деформацій земної поверхні, скоригована методика, підземна розробка вугільних пластів, граничні кути.

PhD in Engineering Larchenko V. G., Kovalenko E. V., Matalkina Yu. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

IMPROVEMENT OF DESIGN PROCEDURE OF THE EXPECTED SHIFTS AND EARTH CRUST DEFORMATIONS DURING COAL MINING

The adjusted design procedure of the expected shifts and earth crust deformations during underground coal mining in the main sections of the trough is given.

Key words: calculation of shifts and earth crust deformations, adjusted procedure, underground coal seams mining, adjacent angles.

**МЕТАЛЛУРГИЯ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**МЕТАЛУРГІЯ
ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCES**

УДК 621.771.23

д.т.н. Снитко С. А.,
д.т.н. Руденко Е. А.,
Пилипенко В. В.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА РЕДУЦИРОВАНИЯ СЛЯБА ПО ШИРИНЕ В УСТАНОВКЕ ТИПА «ТРИПЛЕТ»

На основе результатов конечно-элементного моделирования выполнен анализ процессов редуцирования сляба по ширине по классической схеме и в установке типа «триплет». Показана целесообразность компоновки «горизонтальная клеть – вертикальная клеть – горизонтальная клеть» с валками с гладкой бочкой. Предложен режим редуцирования сляба, обеспечивающий снижение суммарной длины искажённых концов раската на ~30 %.

Ключевые слова: форма раската в плане, редуцирование сляба по ширине, физический эксперимент, конечно-элементное моделирование, концевая обрезь, установка «триплет», неприводные валки.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Редуцирование слябов в валках универсальной клетки является одним из основных способов регулирования ширины непрерывнолитых слябов. После операций редуцирования и проглаживания образуются дефекты формы — стрелы вогнутости и утяжка ширины переднего и заднего торцов раската.

Известны технические решения [1, 2], направленные на повышение эффективности редуцирования и оптимизацию формы раската в плане, однако исследования, направленные на поиск рациональных параметров процесса, проводятся до сих пор [3–5].

В технической литературе имеется информация о редуцирующих агрегатах оригинальной конструкции типа «триплет», которые позволяют совмещать процесс редуцирования и прокатки сляба за несколько реверсивных проходов. Так, в Швеции разработан агрегат, представляющий собой непрерывную группу из трёх приводных клеток [6]. Предусмотрено горизонтальное расположение эджерных валков с калибрами, в связи с чем после нагрева в печи сляб подаётся на кантователь и устанавливается «на ребро» (рис. 1).

Вариант прокатки, когда сляб расположен горизонтально в валках трёхклетьевого ре-

версивного стана типа «триплет» (вертикальная клеть – горизонтальная клеть – вертикальная клеть), реализован в Японии на заводе фирмы Nippon Steel [8]. Особенностью технологии является обеспечение близкого к нулю межклетевого подпора (натяжения) во избежание перегрузки приводных двигателей и поломки валков. Кроме того, горизонтальные валки — неприводные.

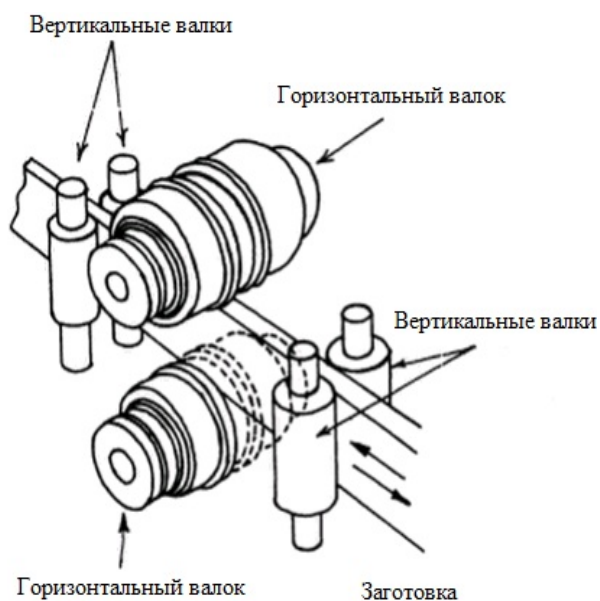


Рисунок 1 Схема расположения валков в установке типа «триплет» [7]

Известно, что в установках типа «триплет» возможна прокатка с подпором, за счёт чего можно достичь значительного снижения концевой обрезки раската.

Несмотря на то, что конструкции стана типа «триплет» далеко не новы, объём доступной информации о схемах и режимах редуцирования слябов в этих установках весьма ограничен [9]. В связи с этим установление рационального способа и параметров редуцирования непрерывнолитых слябов в установках такого типа представляет как научный, так и практический интерес.

Постановка задачи. Задачей данной работы является исследование процесса редуцирования сляба по ширине в установке типа «триплет» с целью определения рациональных параметров прокатки, обеспечивающих высокую гибкость технологического процесса и минимизацию искажения формы раската в плане.

Изложение материала и его результаты. В качестве базовой выбрана следующая схема компоновки клеток: горизонтальная клетка – вертикальная клетка – горизонтальная клетка (рис. 2).

В качестве метода исследования использовали компьютерное конечно-элементное моделирование в системе Deform 3D. При этом полагали, что деформирование левой и правой частей сляба проходит в одинаковых условиях, и моделирование выполнено для 1/2 части сляба с плоскостью симметрии посередине его ширины (рис. 2). Это обеспечило, с одной стороны, уменьшение размерности задачи. С другой стороны, это позволило в достаточной степени измельчить размер элементов сетки вблизи рёбер и углов сляба, где имеет место максимальное формоизменение металла (большие значения градиентов деформаций, напряжений и температур).

При этом на первом этапе необходимо было выполнить проверку адекватности используемой математической модели. С этой целью на лабораторном стане 100 ГОУ ВПО «ДонГТУ» (рис. 3) была вы-

полнена прокатка образцов, подвергаемых редуцированию по ширине (боковому обжатию).

Условия проведения физического эксперимента приведены в таблице 1.

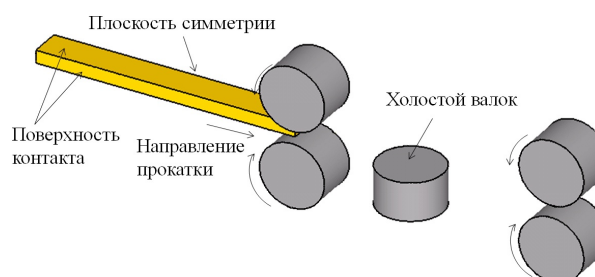


Рисунок 2 Принятая схема редуцирования сляба в установке типа «триплет»



Рисунок 3 Стан 100 прокатной лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением»

Таблица 1

Условия прокатки сляба на лабораторном стане 100

Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение параметра
Толщина сляба	H	10 мм
Ширина сляба	B	62 мм
Длина сляба	L	89 мм
Материал сляба		Свинец
Боковое обжатие	Δb	16 %
Диаметр валков	D_b	62 мм
Скорость прокатки	V_b	23 мм/с

Для обеспечения устойчивости раската при прокатке на гладкой бочке использовались удерживающие линейки. В силу технических особенностей стана прокатка сляба производилась «на ребро». Для повышения захватывающей способности применялись валки с грубой насечкой.

При аналогичных условиях было выполнено конечно-элементное моделирование процесса редуцирования сляба в гладких цилиндрических валках. Тип материала заготовки выбран пластический. Тип объекта валков — жёсткий недеформируемый. Для моделирования были выбраны изотермические условия. В качестве модели контактного трения использовали модель Э. Зибеля. Для условий сухого трения при горячей прокатке показатель сил трения был равен 0,7.

Полученные результаты моделирования сравнили с экспериментальными данными. Расчётные значения высоты наплывов после прокатки несколько ниже экспериментальных, при этом максимальные отклонения расчётных данных от экспериментальных не превысили 5 %.

Проверку адекватности полученных результатов конечно-элементного моделирования выполняли также путём сравнения расчётных и экспериментальных значений вогнутости переднего и заднего торцов раската, а также их толщин по плоскости симметрии сляба после редуцирования. Максимальные отклонения расчётных данных от экспериментальных не превысили 8 %.

Таким образом, проверка адекватности полученных при моделировании параметров формоизменения сляба относительно данных физического эксперимента позволила сделать вывод о возможности применения данного подхода для изучения закономерностей процесса редуцирования слябов по ширине и оценке эффективности новых технических решений.

Поэтому на следующем этапе работы было выполнено конечно-элементное моделирование двух схем редуцирования слябов 6000×300×1450 мм из стали 09Г2С в валках диаметром 1500 мм. Скорость

вращения приводных валков составляла 13 об/мин. Расстояние между осями валков смежных клеток приняли равным 3000 мм.

Исходная температура сляба была равна 1150 °С. При моделировании учитывали теплообмен сляба с окружающей средой и валками, а также разогрев металла вследствие теплового эффекта деформации. Реологические кривые с учётом химического состава стали 09Г2С и её разупрочнения за счёт динамической рекристаллизации в диапазоне температур 1000–1260 °С были построены по методике работы [10].

Исследуемыми параметрами приняты следующие величины (рис. 4): f_n — вогнутость переднего торца раската; f_z — вогнутость заднего торца раската; δ_n — утяжка ширины переднего конца раската; l_n — длина переднего утянутого конца раската; δ_z — утяжка ширины заднего конца раската; l_z — длина заднего утянутого конца раската; P_v , M_v — соответственно сила и момент редуцирования в вертикальных валках; P_r , M_r — соответственно сила и момент проглаживания прикромочных наплывов в горизонтальных валках.

Для случая прокатки по классической схеме (в вертикальных, а потом в горизонтальных валках) было назначено боковое обжатие $\Delta b = 80$ мм и проглаживание с обжатием тела сляба $\Delta h = 15$ мм.

Для случая прокатки по схеме «триплет» в первой паре горизонтальных валков назначено обжатие сляба $\Delta h_1 = 10$ мм, затем боковое обжатие в холостых валках $\Delta b = 80$ мм (рис. 5, а), а во второй паре горизонтальных валков назначено проглаживание сляба с обжатием относительно исходной высоты сляба $\Delta h_2 = 5$ мм (рис. 5, б).

Отличительной особенностью принятой в рамках данной работы схемы и режима прокатки в установке типа «триплет» является то, что все валки имеют гладкую бочку (рис. 2, 5), а валки вертикальной редуцирующей клетки — неприводные.

Такая компоновка, очевидно, позволит сократить капитальные затраты и упростить систему управления станом.

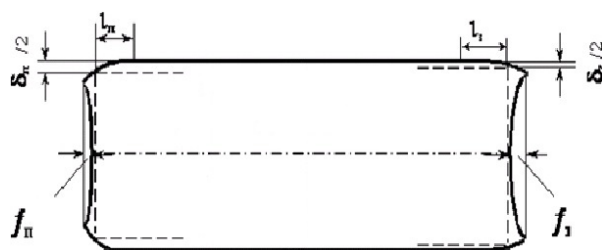


Рисунок 4 Исследованные при моделировании параметры формы раската в плане

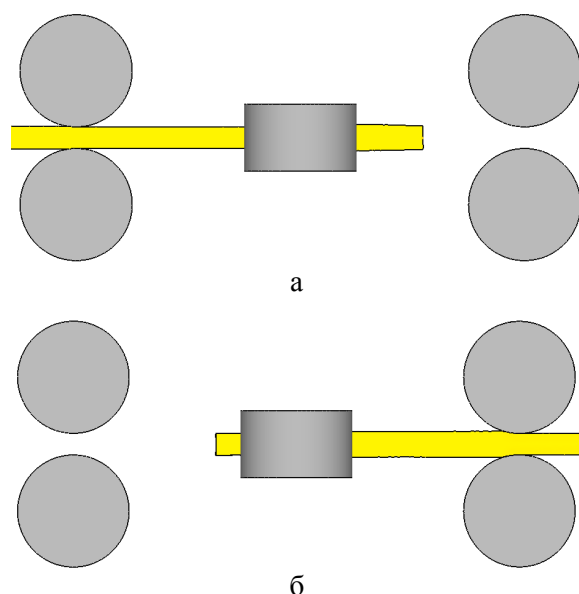


Рисунок 5 Результаты моделирования прокатки сляба по схеме «триплет»:
 а — начальная стадия редуцирования сляба по ширине; б — заключительная стадия редуцирования сляба по ширине, совмещённая со стадией проглаживания прикромочных наплывов

Положительным моментом использования редуцирующих валков с гладкой бочкой является, во-первых, их универсальность в части возможности использования одного комплекта валков для различных толщин исходного сляба, а также нечувствительность технологического процесса к колебаниям ширины и толщины исходных слябов.

Во-вторых, при прочих равных условиях, валки с гладкой бочкой обеспечивают большее значение катающего диаметра вала, что при редуцировании будет способствовать проникновению деформации в цен-

тральные слои сляба. При этом низкая захватывающая способность гладких валков в данной ситуации не сыграет существенной роли, так как начальная стадия редуцирования будет осуществляться за счёт проталкивания сляба горизонтальными валками предыдущей клетки (рис. 5, а). На заключительной стадии реализуется процесс протягивания сляба через вертикальные валки редуцирующей клетки за счёт его обжатия горизонтальными приводными валками следующей по ходу прокатки клетки (рис. 5, б).

И на начальной, и на заключительной стадиях устойчивость сляба при редуцировании будет обеспечиваться за счёт постоянного контакта раската с горизонтальными валками предыдущей и (или) последующей клетки. Исключение пробуксовок валков горизонтальных клеток обеспечивается правильным назначением величин Δh_1 и Δh_2 , которые непосредственно зависят от величины бокового обжатия сляба (Δb).

Полученные на основе результатов моделирования параметры формоизменения металла и силовые параметры процессов прокатки слябов по двум указанным выше схемам представлены в таблице 2 и на рисунке 6.

Таблица 2
 Сравнительная характеристика способов прокатки

Параметр	Классическая схема	Схема «триплет»
f_{π} , мм	88	66
f_3 , мм	66	78
δ_{π} , мм	90	88
l_{π} , мм	339	299
δ_3 , мм	19	38
l_3 , мм	346	371
P_{π} , МН	10,3	10,7
M_{π} , МН*М	1,59	-
P_r , МН	11,6	$P_{r1} = 8,1$ $P_{r2} = 9,7$
M_r , МН*М	1,22	$M_{r1} = 1,26$ $M_{r2} = 1,6$

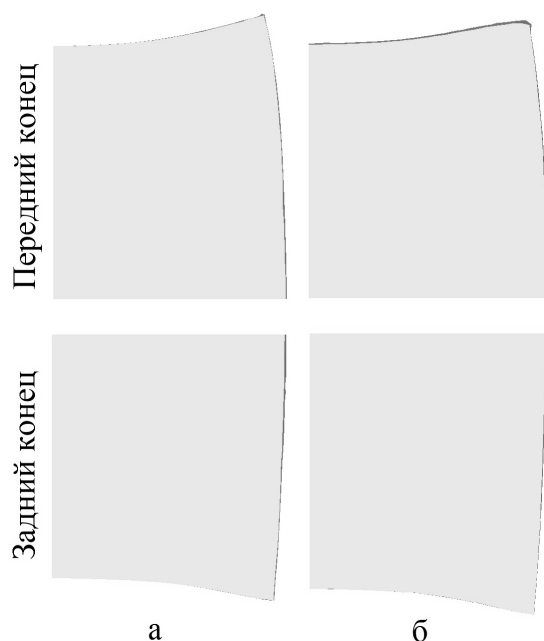


Рисунок 6 Форма концов раската в плане после редуцирования и проглаживания: а — по классической схеме; б — по схеме «триплет» (с неприводными вертикальными валками)

Анализ результатов показал следующее. Форма переднего конца раската больше искажается при прокатке по классической схеме, а при прокатке по схеме «триплет» больше искажается форма заднего конца. Такое течение металла обуславливается направлением сил трения на контакте с вертикальными валками, выполняющими обжатие сляба по ширине.

При прокатке по классической схеме активные силы контактного трения способствуют продольному течению металла в направлении прокатки, вызывая тем самым увеличение вогнутости переднего конца раската и, соответственно, уменьшение вогнутости заднего (рис. 6, а).

При прокатке по схеме «триплет» указанные выше силы трения на контактных поверхностях вертикальных валков направлены против хода прокатки. Следствием этого является уменьшение вогнутости

сти переднего торца раската и увеличение вогнутости заднего (рис. 6, б).

Вместе с тем, как видно из таблицы 2, суммарная длина искажённых частей переднего и заднего концов раската при прокатке по схеме «триплет» получена меньше на 3 % (25 мм).

Выводы и направление дальнейших исследований. На основе результатов конечно-элементного моделирования выполнен сравнительный анализ процессов редуцирования и проглаживания сляба по классической схеме (в вертикальных, а потом в горизонтальных валках) и по схеме «триплет» (горизонтальная клеть – вертикальная клеть – горизонтальная клеть). Особенностью компоновки «триплета» являлось то, что все валки имеют гладкую бочку, что обеспечивает высокую гибкость технологического процесса, а валки вертикальной редуцирующей клетки — неприводные.

Основываясь на результатах исследований, можно рекомендовать вариант компоновки установки «триплет» с вертикальной клетью с приводными валками. Он, очевидно, более затратный, однако позволяющий добиться максимального улучшения формы раската в плане и, соответственно, снижения концевой обрезки.

Рациональным режимом прокатки, который предлагается в качестве базового, является следующий. Первую по ходу прокатки половину сляба прокатывают в холостых вертикальных валках. Вторую половину сляба, когда задний конец сляба вышел из горизонтальных валков, прокатывают при включённом приводе вертикальных валков. При этом вторая пара горизонтальных валков выполняет только проглаживающее обжатие.

Прогнозируемое по предлагаемой технологии снижение суммарной длины искажённых частей переднего и заднего концов раската, в сравнении с классической схемой, составляет ~30 %.

Библиографический список

1. А. с. № 1565550 СССР, МКИ В 21 В 1/02. Способ прокатки слитков и слябов [Текст] / В. И. Пономарев [и др.]. — № 4148226/31-02 ; заявл. 25.11.86 ; опубл. 23.05.90, Бюл. № 19. — 7 с.
2. А. с. № 1799648 СССР, МКИ В 21 В 1/26. Способ редуцирования слябов по ширине [Текст] / В. В. Оробцев [и др.]. — № 4871969/27 ; заявл. 05.10.90 ; опубл. 07.03.93, Бюл. № 9. — 4 с.
3. Forouzan, M. R. A comparative study of slab deformation under heavy width reduction by sizing press and vertical rolling using FE analysis [Text] / M. R. Forouzan , I. Salehi , A. A. Hossein // *Materials Processing Technology*. — 2009. — № 209. — P. 728–736.
4. Analysis and prediction of fishtail during V-H hot rolling process [Text] / X. Li [et al.] // *Journal of Central South University*. — 2015. — № 22. — P. 1184–1190.
5. Коновалов, Ю. В. Редуцирование непрерывнолитых слябов в технологической линии широкополосных станов горячей прокатки [Текст] / Ю. В. Коновалов, Е. А. Руденко, М. О. Фролова // *Сталь*, 2014. — № 6. — С. 47–53.
6. Strandel, P. O. Critical consideration on rolling in triplet mill [Text] / P. O. Strandel // *Proceedings. Science and Technology of Flat Rolled Products : International Conference on Steel Rolling*. — Tokyo : Iron and Steel Institute of Japan, 1980. — № 1. — P. 599–610.
7. Roberts, William L. Hot Rolling of Steel : Manufacturing engineering and materials processing [Text] / William L. Roberts. — New York : Marcel Dekker, Inc., 1983. — 1040 p.
8. Коновалов, Ю. В. О применении вертикально расположенных валков в технологической линии широкополосных станов и литейно-прокатных агрегатов. Сообщение 1. Пути решения задачи прокатки полос по ширине с градацией через 50 и 100 мм на широкополосных станах горячей прокатки при переводе их на непрерывнолитую заготовку [Текст] / Ю. В. Коновалов, Е. А. Руденко, М. О. Фролова // *Чёрная металлургия. Бюл. НТИ*. — 2014. — № 7. — С. 44–53.
9. Коновалов, Ю. В. О применении вертикально расположенных валков в технологической линии широкополосных станов и литейно-прокатных агрегатов. Сообщение 2. Разработка схем и режимов редуцирования непрерывнолитых слябов по ширине в реверсивных комплексах «вертикальные-горизонтальные валки» широкополосных станов [Текст] / Ю. В. Коновалов, Е. А. Руденко, М. О. Фролова // *Чёрная металлургия. Бюл. НТИ*. — 2014. — № 8. — С. 50–62.
10. Солод, В. С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей [Текст] / В. С. Солод, Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин // *Металл и литьё Украины*. — 2006. — № 7–8. — С. 52–56.

© Снитко С. А.© Руденко Е. А.© Пилипенко В. В.**Рекомендована к печати к.т.н., проф., и.о. зав. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В.**

Статья поступила в редакцию 08.10.19.

д.т.н. Снітко С. О., д.т.н. Руденко Є. О., Пилипенко В. В. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР, snitko_sa@mail.ru)

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ РЕДУКУВАННЯ СЛЯБА ПО ШИРИНІ В УСТАНОВЦІ ТИПУ «ТРИПЛЕТ»

На основі результатів кінцево-елементного моделювання виконано аналіз процесів редукування сляба по ширині за класичною схемою і в установці типу «триплет». Показано доцільність компоновання «горизонтальна кліть – вертикальна кліть – горизонтальна кліть» з валками з гладкою бочкою. Запропоновано режим редукування сляба, що забезпечує зниження сумарної довжини викривлених кінців розкату на ~30 %.

Ключові слова: форма розкату в плані, редукування сляба по ширині, фізичний експеримент, кінцево-елементне моделювання, кінцева обрізь, установка «триплет», неприводні валки.

**Doctor of Technical Science Snitko S. A., Doctor of Technical Science Rudenko E. A.,
Pilipenko V. V. (DonNTU, Donetsk, DPR, snitko_sa@mail.ru)**

**STUDYING THE TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF THE SLAB WIDTH REDUCTION
PROCESS IN THE “TRIPLET” TYPE UNIT**

Basing on the finite-element modeling results there has been carried out the analysis of slab width reduction processes according to the classical scheme and in the “triplet” type unit. There has been shown the practicability of assembly “the horizontal roll stand – the edging stand – the horizontal smooth roll stand”. A slab reduction mode is proposed that reduces the total length of distorted ends of the roll by ~30 %.

Key words: *shape of the roll in plan, slab width reduction, physical experiment, finite-element modeling, crop ends, unit “triplet”, idlers.*

УДК 621.785

д.т.н. Жижкина Н. А.
(ГОУ ЛНР «ЛНАУ», г. Луганск, ЛНР, litjo_snu@mail.ru)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАССИВНЫХ ВАЛКОВ

Работа посвящена разработке технологии термической обработки массивных валков в газовых камерных печах с выдвижным подом. Установлена неравномерность прогрева валков, вызвавшая повышение неоднородности в уровне их свойств. В работе предложены реконструкция горелок в печи и корректирование режима термической обработки. В результате снижения твёрдости и внутренних напряжений на 5–10 % их неравномерность вдоль изделия снизилась в 2 раза.

Ключевые слова: валок, газовая термическая печь с выдвижным подом, равномерность прогрева, свойства, термическая обработка.

Постановка проблемы, обоснование её актуальности. Ужесточение требований к качеству современной металлопродукции обуславливает увеличение интенсивности работы металлургического оборудования. Анализ условий работы металлургического оборудования [1] показал, что его элементы подвержены значительным знакопеременным силовым нагрузкам, воздействию высокой температуры, переменному нагреву и охлаждению, ударно-абразивному износу и влиянию агрессивных коррозионных сред. В результате требования к эксплуатационным свойствам элементов металлургического оборудования противоречивы и зачастую отличаются от характеристик материалов, из которых их изготавливают. Вот почему важнейшим и актуальным направлением в модернизации металлургического оборудования являются работы, касающиеся разработки новых материалов для изготовления его элементов.

Анализ последних исследований и публикаций по данной проблеме, вскрытие их недостатков и противоречий. Известно [2], что свойства материала зависят как от сил межатомного взаимодействия его химических компонентов, так и от наличия в нём структурных несовершенств: точечных, двумерных, трёхмерных. В связи с этим приготовление материала, когда возможно одновременно воздействовать на

размер первичных зёрен, морфологию металлической основы, упрочняющих фаз и неметаллических включений, является эффективным методом воздействия на формирование необходимого уровня механических и специальных свойств изделия. Такое воздействие включает процессы легирования, модифицирования и рафинирования, технология которых предопределяется составом и состоянием базового расплава.

В результате исследований влияния легирующих элементов на структуру и свойства материалов разработаны специальные чугуны и стали для элементов металлургического оборудования. Показано, что необходимый комплекс механических и эксплуатационных свойств обеспечивает дополнительное их легирование хромом, никелем, молибденом, ниобием, ванадием, медью и другими элементами [3].

Вместе с тем в результате структурных превращений, происходящих в сложнелегированных материалах в процессе формирования изделий, образуются напряжения, неоднородно распределённые в их объёмах. Вследствие этого общий уровень напряжений повышается, что оказывает отрицательное влияние на целостность и работоспособность изделия в целом [4].

Известно [5], что существуют три пути снижения уровня внутренних напряжений в теле изделия:

– медленное охлаждение изделия в процессе его изготовления, что позволяет получить необходимый уровень свойств и одновременно предотвратить наложение дополнительных напряжений в его теле. Однако такой процесс трудно контролировать;

– естественное старение. Установлено, что с течением времени происходит снижение общего уровня напряжений за счёт их перераспределения в теле изделия. Но естественное старение — длительный процесс, а его эффективность составляет только 20–30 %, чего недостаточно для изделий из сложнолегированных сплавов;

– термическая обработка, позволяющая регулировать уровень свойств и внутренних напряжений в изделии в зависимости от его назначения и исходной структуры. Такая обработка является наиболее действенным способом не только в снижении уровня напряжений в изделии, но и стабилизации его структуры и свойств.

Определение нерешённых ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья. Для повышения свойств и снижения общего уровня внутренних напряжений в изделиях из различных сложнолегированных сплавов разработаны режимы и параметры термической обработки. Для снижения уровня внутренних напряжений в изделии при сохранении уровня механических свойств (твёрдости, прочности) предложены режимы термоциклической обработки, представляющие комбинации отжига до 773–973 К. Такие режимы термообработки способствуют снижению уровня внутренних напряжений до 70 % и стабилизации структуры сложнолегированных материалов [5]. Для повышения механических свойств изделий из сложнолегированных материалов в работах [5–7] предложены технологии химико- и радиационно-термических обработок, нормализации с отпуском, улучшения, изотермической закалки.

Вместе с тем результаты собственных исследований [5] показывают, что параметры термической обработки зависят не только от исходной структуры и назначения изделия, но и от его размеров и массы. Именно по-

следние показатели определяют равномерность прогрева изделия по объёму, а следовательно, характер структурных изменений.

В связи с этим возникла необходимость в проведении дополнительных исследований равномерности прогрева изделий для металлургического оборудования.

Формулирование цели, объекта, предмета и задач исследований. Одним из ответственных элементов металлургического оборудования является прокатный инструмент, или валок, масса которого достигает 20 тонн. Для удовлетворения требований по износостойкости и прочности его изготавливают из разнородных сложнолегированных материалов, что вызывает формирование структурных неоднородностей, а следовательно, повышение уровня напряжений в нём. Для устранения такого эффекта валки подвергают термической обработке, наиболее эффективным агрегатом для осуществления которой является газовая камерная печь с выдвижным подом [5].

В связи с этим целью настоящей работы явилась разработка технологии термической обработки массивных валков в газовых камерных печах с выдвижным подом.

Объект исследования — технологический процесс термической обработки массивных валков в газовой камерной печи с выдвижным подом.

Предмет исследования — закономерности термической обработки массивных валков из сложнолегированных материалов в газовой камерной печи с выдвижным подом.

Задачи исследования:

– оценка равномерности прогрева по объёму валков в процессе термической обработки в принятом режиме;

– определение влияния неравномерности прогрева валков на уровень их свойств;

– выявление способов повышения эффективности работы газовой камерной печи с выдвижным подом в процессе термической обработки массивных валков.

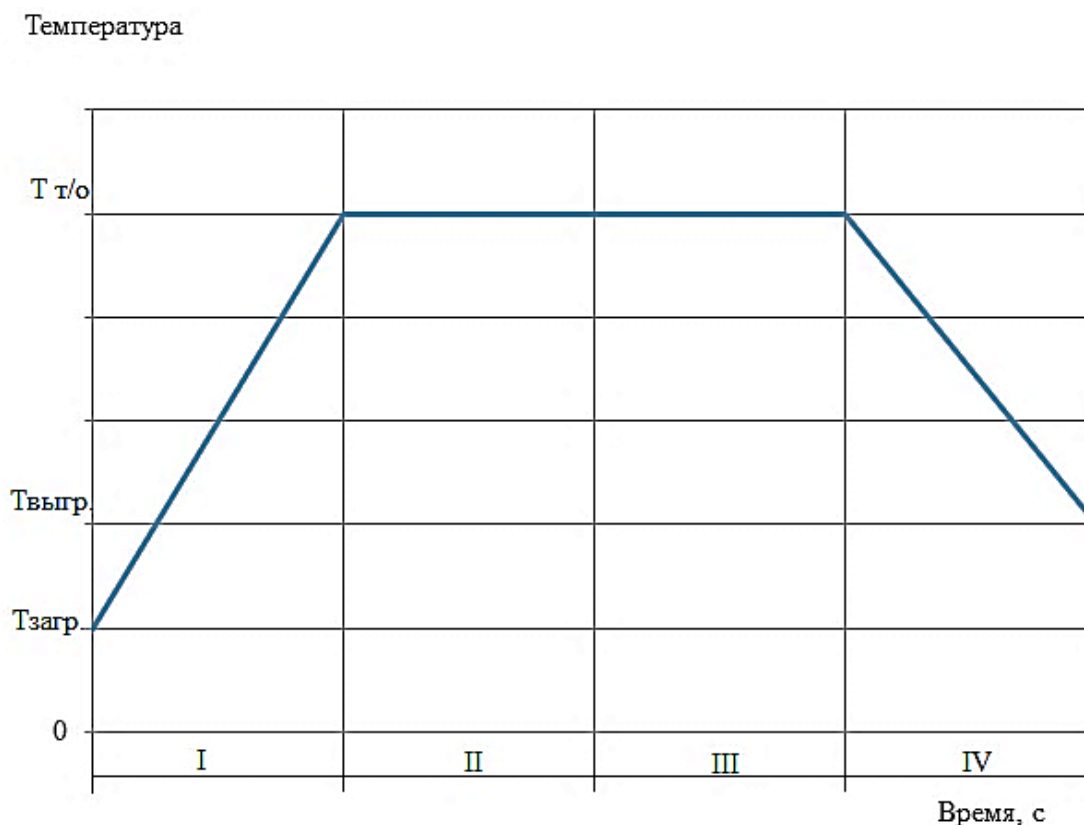
Описание и обоснование принятой методики исследований. Исследование термической обработки массивных валков

проводили в промышленных газовых камерных печах с выдвижным подом. Температуру термической обработки выбрали согласно разработкам, представленным в работе [8] для валка в зависимости от его исходной структуры и назначения. Скорость нагрева составляла 291–298 К/ч, а охлаждения — 275–293 К/ч. Продолжительность выдержки при необходимой температуре нагрева выбирали из расчёта 1 ч на 25 мм сечения валка (рис. 1).

Такие параметры термической обработки основывались на теоретических расчётах изменения температурного поля и напряжений, а также возможной диффузии легирующих элементов при нагреве валков [5]. Превыше-

ние названных пределов скорости приводит к неравномерному нагреву (охлаждению) отличающихся по сечению шеек и бочки массивного валка и формированию значительного градиента температур внутри него. Это вызывает в массивном валке изменяющиеся во времени и по его объёму термические напряжения, которые, суммируясь с довольно высокими внутренними напряжениями, создают опасность возникновения трещин в изделии или его разрушение.

Для выравнивания температур по объёму валка предложено проведение термодинамической обработки, а также разработаны дополнительные технологические остановки в его режиме.



I — нагрев массивных валков в печи до необходимой температуры термической обработки;

II — выравнивание температуры вдоль массивных валков;

III — прогрев массивных валков по их сечению;

IV — медленное их охлаждение до температуры выгрузки из печи

Рисунок 1 Принципиальная схема режима термической обработки массивных валков из сложнолегированных материалов

Изложение основного материала теоретических и экспериментальных исследований с обоснованием достоверности полученных научных результатов. Для исследования равномерности прогрева по объёму массивных валков из сложнолегированных материалов в процессе термической обработки по разработанному режиму (см. рис. 1) установили контрольные датчики температуры в рабочем пространстве печи и непосредственно на исследуемых изделиях.

Расположение исследуемых валков в печи осуществляли так, чтобы факел не омывал непосредственно их тела. Нагрев исследуемых валков осуществляли только посредством циркуляции горячих газов в рабочем пространстве печи. Такое распо-

ложение исследуемых валков в печи должно было обеспечить равномерность процесса их прогрева как по поверхности, так и по сечению [8].

В результате исследования получено, что режим термической обработки массивных валков в газовой камерной печи с выдвижным подом соответствует заданному (рис. 2).

Выявлено, что исследуемые валки характеризовались меньшими скоростями нагрева по сравнению с печью. Это можно объяснить разницей в начальных температурах (в среднем 323 К). Показано, что выравнивание температуры печи и исследуемых валков происходило только на этапе выдержки при необходимой температуре нагрева.

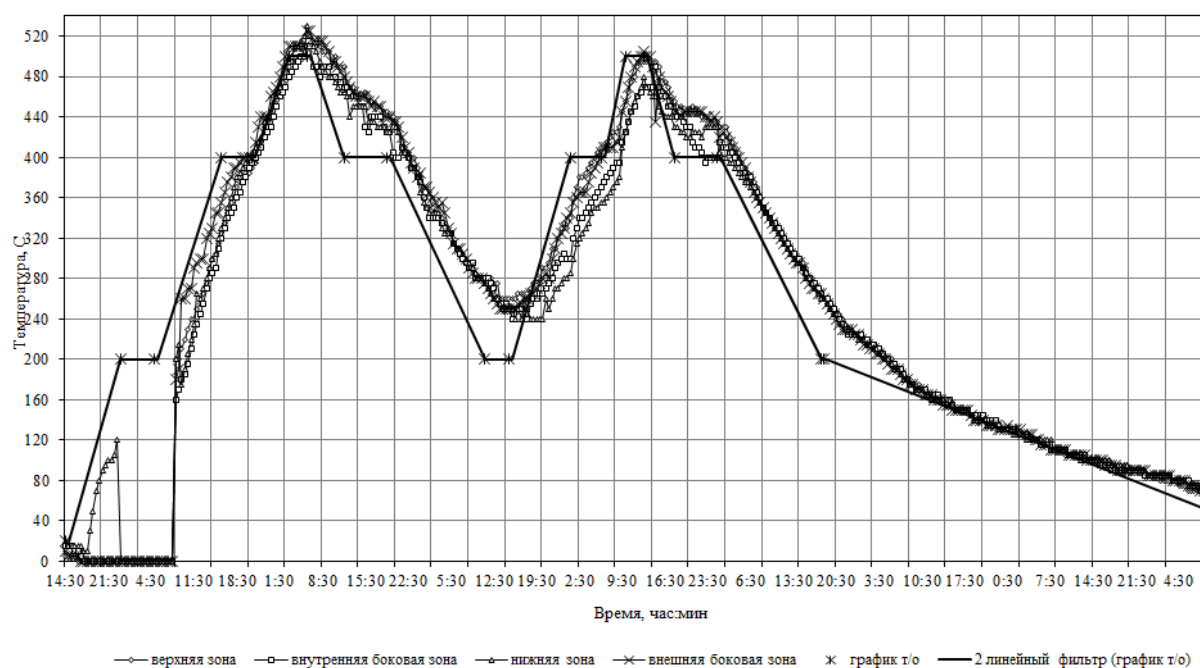


Рисунок 2 Изменение температуры нагрева-охлаждения поверхности бочки исследуемого валка, наиболее удаленного от заслонки печи

Установлено, что наиболее близкие значения температуры к заданному режиму термической обработки показали датчики, установленные на валке, наиболее удаленном от заслонки печи. Анализ термической обработки этого валка в зонах (см. рис. 2), различно расположенных

относительно его диаметра, позволил установить неравномерность процесса нагрева. При этом в процессе первого цикла термической обработки температуры нагрева верхней зоны этого исследуемого валка, обращенной к своду печи, и его внешней боковой зоны, обращенной к го-

релкам, превысили в среднем на 313 К температуры нагрева двух других зон исследуемого вала: внутренней боковой, обращённой к центру печи, и нижней, обращённой к поду.

В связи с тем, что была выявлена неравномерность нагрева валков, по-разному расположенных в рабочем пространстве печи, а также вдоль их поверхности, интерес представляли исследования влияния неравномерности нагрева исследуемых валков на уровень их свойств и внутренних напряжений.

Исследования показали, что на обоих валах была уменьшена неравномерность в распределении внутренних напряжений вдоль их поверхности. При этом уровень внутренних напряжений, оценённый методом измерения коэрцитивной силы [9], у вала, расположенного у заслонки печи, снизился в среднем на 6,1 %, а у вала, наиболее удалённого от заслонки печи, — на 15,6 %.

Результаты исследований изменения уровня внутренних напряжений по диаметру валков показали незначительное повышение неравномерности их уровня на 1,4 % у вала, расположенного у заслонки печи. В валке, наиболее удалённом от заслонки печи, неравномерность уровня внутренних напряжений по его диаметру снизилась на 2,6 %.

В результате неравномерного нагрева выявлено незначительное повышение неоднородности твёрдости вдоль поверхности исследуемых валков.

В результате исследований установлено, что неравномерность прогрева исследуемых валков в печи превысила (более чем в 5 раз) допустимые значения температурной неоднородности, предусмотренной для газовых камерных печей с выдвижным подом. В результате произошло нарушение движения греющих газов внутри печи, увеличение подсосов холодного воздуха, что способствовало повышению неравномерности нагрева массивных валков из сложнолегированных материалов.

Повышение равномерности прогрева рабочего пространства газовой камерной

печи с выдвижным подом, а следовательно, и термообрабатываемых массивных валков возможно при условии интенсивной циркуляции греющих газов вокруг них, получения греющей среды с равномерным полем температур, уменьшения тепловой инерции футеровки печи.

С учётом вышеизложенного были внесены коррективы в конструкцию газовой камерной печи с выдвижным подом (её горелок), а также в режимы термической обработки: увеличено время выдержки на каждой ступени термической обработки, что обеспечило равномерность нагрева и охлаждения массивных валков. Как результат, термообработанные массивные валки из сложнолегированных материалов характеризовались более низким уровнем твёрдости и внутренних напряжений (на 5–10 %). При этом разброс их значений вдоль вала снизился в 2 раза.

Выводы о научной новизне и практической ценности результатов, направление дальнейших исследований. Впервые освоена технология и оборудование термической обработки массивных валков из сложнолегированных материалов в газовых камерных печах с выдвижным подом. В результате исследования равномерности прогрева разных зон массивных валков, различно расположенных в пространстве печи, установили, что в зависимости от положения вала температура в различных зонах его объёма изменялась в пределах до 323 К. Это вызвало повышение неоднородности твёрдости вдоль вала.

Для устранения неравномерности прогрева вала в процессе термической обработки проведена реконструкция горелок и внесены коррективы в её режим: введены дополнительные выдержки при нагреве и охлаждении. В результате при снижении твёрдости и внутренних напряжений на 5–10 % их неравномерность вдоль термообработанного массивного вала снизилась в 2 раза по сравнению с литым состоянием, что повысило его эксплуатационную стойкость на 20 %.

Вместе с тем разработка новых типов валков путём применения новых химических составов материалов для их изготовления обуславливает изменения в технологии термической обработки. Поэтому работа в этом направлении продолжается.

Библіографічний список

1. Budagyants, N. A. High-wear-resistant cast iron for rolls of hot rolling [Text] / N. A. Budagyants, N. A. Zhizhkina, D. A. Sirota, V. I. Kondratenko, V. P. Saushkin // *Proceedings of III international symposium on tribo-fatigue*. — Beijing : Hunan University Press, 2000. — P. 236–239.
2. Жижкина, Н. А. Методы совершенствования качества прокатных валков [Текст] / Н. А. Жижкина, Н. А. Будагьянц, Ю. И. Гутько // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. — Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2008. — № 6, ч. 1. — С. 57–61.
3. Пат. 23995 Україна, МПК С 22 С 38/00. Зносостійкий сплав для прокатних валків [Текст] / Н. М. Можарова, Т. С. Скобло, М. А. Будаг'яни, Н. О. Жижкіна та ін. ; заявник та патентовласник Можарова Наталія Олександрівна. — № u200702048 ; заявл. 26.02.2007 ; опубл. 11.06.2007, Бюл. № 8.
4. Будагьянц, Н. А. Исследование напряжённого состояния чугуновых биметаллических валков для станов горячей прокатки [Текст] / Н. А. Будагьянц, Н. А. Жижкина // *Сучасні проблеми металургії : матеріали наук.-практ. конф.* — Дніпропетровськ : Системні технології, 2001. — С. 367–373.
5. Жижкина, Н. А. Технологические основы повышения качества листопрокатных валков [Текст] : монография / Н. А. Жижкина. — Брянск : БГТУ, 2015. — 180 с.
6. Шляхов, С. М. Напряжённо-деформированное состояние валов после цементации [Текст] / С. М. Шляхов, И. А. Казаковцев // *Аэрокосмические технологии : труды междунар. науч.-техн. конф.* — Воронеж, 2006. — С. 360–364.
7. Скобло, Т. С. Повышение эксплуатационной стойкости роликов валковой арматуры из чугунов упрочнением радиационно-термической обработкой [Текст] / Т. С. Скобло, Н. М. Можарова // *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов (ОТТОМ-7) : сб. докл. междунар. науч.-техн. конф.* — Х., 2006. — Разд. 2. — С. 69–73.
8. Жижкина, Н. А. Производство центробежнолитых валков с высоколегированным рабочим слоем [Текст] : монография / Н. А. Жижкина. — Луганск : Ноулидж, 2011. — 167 с.
9. Zhizhkina, N. The development of non-destructive quality control of massive castings [Text] / N. Zhizhkina, S. Kuzovov // *Metallurgical and Mining Industry*. — 2016. — № 9. — P. 28–33.

© Жижкина Н. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. материаловедения ЛНУ им. В. Даля Рябичевой Л. А.

Статья поступила в редакцию 30.09.19.

д.т.н. Жижкіна Н. О. (ДОЗ ЛНР «ЛНАУ», м. Луганськ, ЛНР)

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ МАСИВНИХ ВАЛКІВ

Роботу присвячено розробленню технології термічного оброблення масивних валків в газових камерних печах з висувним подом. Встановлено нерівномірність прогріву валків, що сприяло підвищенню неоднорідності в рівні їх властивостей. В роботі запропоновано проведення реконструкції горілок в печі та корегування режиму термічного оброблення. В результаті зниження твердості та внутрішніх напружень на 5–10 % їх нерівномірність вздовж виробу знизилась у 2 рази.

Ключові слова: валок, властивості, газова термічна піч з висувним подом, рівномірність прогріву, термічне оброблення.

Doctor of Technical Science Zhyzhkina N. A. (SEI LPR "LNAU", Lugansk, LPR, litjo_snu@mail.ru)
IMPROVEMENT OF HEAT TREATMENT TECHNOLOGY OF MASSIVE ROLLS

The paper focuses on the development of heat treatment of massive rolls in gas chamber bogie-hearth furnaces. The non-uniformity of roll heating was determined, which caused increasing of inhomogeneity in the level of their properties. The paper proposes the reconstruction of flares in the furnace and the adjustment of the heat treatment mode. Following the weakening of the property level and internal stresses by 5–10 %, their unevenness along the product decreased by 2 times.

Key words: roll, gas-fired bogie-hearth furnace, uniformity of heating, properties, heat treatment.

УДК 531.31.15+669

Мороз В. В.,
к.ф.-м.н. Рубежанский В. И.,
к.т.н. Левченко Э. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

К ВОПРОСУ МНОГОСТАДИЙНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА В ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ

Выполнен сравнительный анализ возможности подачи кусков агломерата звёздочками ротора одновалковой зубчатой дробилки с целью обеспечения многоступенчатого дробления на консольных колосниках и выявления условий сползания материала по мере его подъёма в верхнюю часть рабочей камеры. На основе уравнений Лагранжа подтверждена закономерность движения куска агломерата по плоскости зуба дробилки.

Ключевые слова: многостадийная одновалковая зубчатая дробилка, уравнения Лагранжа, закон движения, аналитический расчёт, сравнительный анализ.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из главных направлений повышения эффективности работы доменных печей является увеличение их производительности и снижение расхода кокса [1].

Известно, что в настоящее время в технологически развитых странах, таких как Япония, США, Франция, Италия, ФРГ, используют железорудный материал в основном крупностью 5–35 мм, а фракции 0–5 мм в скипе содержится не более 5–7 % [2], что обеспечивает не только меньший удельный вынос пыли из колошника, но и наивысшие технико-экономические показатели работы доменной печи.

За рубежом агломерат готовят двухстадийным дроблением и четырёх- или пятикратным грохочением, хотя в целом общие единичные показатели работы этих машин остаются невысокими [3].

М. Ю. Рябчиков указывает, что для повышения эффективности работы доменной печи следует использовать агломерационное сырьё, имеющее стабильные форму, механическую прочность и гранулометрический состав с наименьшим количеством частиц размерами меньше 5 мм [4].

Изучение влияния параметров доменной плавки на результаты работы доменных печей в условиях ОАО «Уральская

сталь» на основе статистического анализа производственных данных, по мнению Д. А. Морозовой, подтверждает, что отсеб мелочи (0–5 мм) непосредственно перед загрузкой в скип повышает эффективность работы печи, а также сокращает расход топлива и способствует улучшению её газодинамики [5].

В связи с тем, что использование типовых конструкций одновалковых зубчатых дробилок для фрагментации агломерационного пирога не позволяет получить строго классифицированный агломерат фракционного состава, близкого к оптимальным размерам, предлагается создать в них условия многостадийного дробления. Именно работа таких машин в замкнутом цикле позволит исключить наличие крупных кусков, склонных в дальнейшем к саморазрушению, и обеспечить величину готового продукта на уровне передовых технологий.

Поэтому актуальным вопросом является организация в обычной одновалковой зубчатой дробилке, путем её несложного усовершенствования, многократного наложения усилий [6, 7], что требует всестороннего изучения таких процессов.

Постановка задачи. Задачей исследований является установление возможности организации подачи кусков агломерата в верхнюю часть многоступенчатой

модернизированной конструкции одно-валковой зубчатой дробилки с помощью самих зубьев ротора и сравнение аналитических результатов, полученных по независимым методикам исследований.

Изложение материала и его результаты. В результате предыдущего анализа [8] возможности обеспечения подачи агломерата с помощью зубьев ротора на последующее многоступенчатое дробление по высоте рабочей камеры одновалковой зубчатой дробилки получено следующее дифференциальное уравнение движения куска по лопасти звёздочки ротора, вращающегося с постоянной угловой скоростью:

$$\ddot{X} + 2 \cdot \omega \cdot \dot{f} \cdot \dot{X} - \omega^2 X = g \cdot [-f \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha_1) - \sin(\omega \cdot t + \alpha_1)], \quad (1)$$

где X — перемещение куска агломерата; ω — угловая скорость вращения ротора; g — ускорение свободного падения; f — коэффициент трения; t — время движения; α_1 — угол начала движения куска агломерата по лопасти.

Решение данного уравнения, где учтены переносная и кориолисова силы инерции, имеет вид

$$X = C_1 \cdot e^{(k_1-b)t} + C_2 \cdot e^{-(k_1+b)t} + B_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha_1) + B_2 \cdot f \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha_1), \quad (2)$$

где C_1 и C_2 — постоянные интегрирования; k_1 , b , B_1 , B_2 — известные функции угловой скорости ω вращения ротора и коэффициента трения f .

Для составления уравнений движения куска агломерата можно применить метод Лагранжа. Кусок агломерата в вертикальной плоскости имеет две степени свободы. В качестве обобщённых координат выберем: X — положение на зубе звёздочки, φ — угол отклонения зуба звёздочки от горизонтали (рис. 1).

Тогда общий вид уравнений Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\dot{x}} \right) - \frac{dT}{dx} = Q_x; \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\dot{\varphi}} \right) - \frac{dT}{d\varphi} = Q_\varphi,$$

где T — кинетическая энергия куска агломерата; Q_x и Q_φ — обобщённые силы, соответствующие выбранным координатам.

Кинетическая энергия:

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_{abc}^2, \quad (4)$$

где

$$\bar{V}_{abc} = \bar{V}_{отн} + \bar{V}_{пер}. \quad (5)$$

Здесь

$$\bar{V}_{отн} = \dot{x}; \quad V_{пер} = \omega \cdot x = \dot{\varphi} \cdot x.$$

Так как скорость $\bar{V}_{отн}$ направлена перпендикулярно скорости $\bar{V}_{пер}$, то

$$V_{abc}^2 = V_{отн}^2 + V_{пер}^2 = \dot{x}^2 + x^2 \cdot \dot{\varphi}^2.$$

В обобщённых координатах и обобщённых скоростях энергия примет вид

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\dot{x}^2 + x^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \right). \quad (6)$$

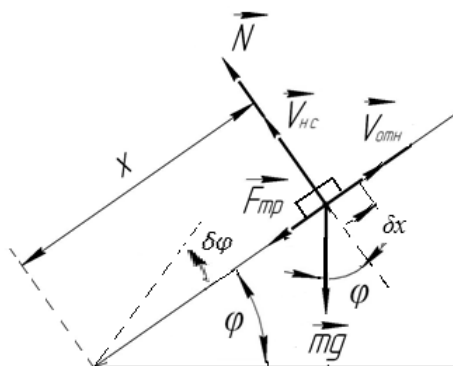


Рисунок 1 Схема для составления уравнений Лагранжа

Для вычисления обобщённых сил:

а) сообщим агломерату возможное перемещение, при котором $\delta x \neq 0$ ($\delta x > 0$), а $\delta \varphi = 0$.

Тогда сумма возможных работ, действующих на кусок агломерата

$$\sum_k \delta A_k = -F_{mp} \cdot \delta x - m \cdot g \cdot \sin \delta x = Q_x \cdot \delta x, \quad (7)$$

откуда

$$Q_x = -F_{mp} - m \cdot g \cdot \sin \varphi; \quad (8)$$

б) теперь $\delta x = 0$, а $\delta \varphi \neq 0$ ($\delta \varphi > 0$), что даёт

$$\sum_k \delta A_k = N \cdot x \cdot \delta \varphi - m \cdot g \cdot \cos \varphi = Q_\varphi \cdot \delta \varphi, \quad (9)$$

откуда

$$Q_\varphi = N \cdot x - m \cdot g \cdot \cos \varphi. \quad (10)$$

Подставляя найденные величины Q_x , Q_φ и требуемые производные функции энергии T в (3) получим дифференциальные уравнения сложного движения куска агломерата:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} - m \cdot \dot{x} \cdot \dot{\varphi}^2 - F_{тр} - m \cdot g \cdot \sin \varphi; \\ 2 \cdot m \cdot \dot{x} \cdot \dot{\varphi} + m \cdot x^2 \cdot \ddot{\varphi} = N \cdot x - m \cdot g \cdot x \cdot \cos \varphi. \end{cases} \quad (11)$$

Так как в поставленной задаче $\varphi = \omega = const$, то $\ddot{\varphi} = 0$ и второе уравнение даст возможность определить силу реакции:

$$N = m \cdot g \cdot \cos \varphi + 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x}. \quad (12)$$

Заметим, что силу реакции N можно найти, применяя теорему об изменении момента количества движения материальной точки относительно центра О (рис. 1):

$$\frac{d}{dt} \left[m_o \left(\bar{m} \cdot V_{a\bar{o}c} \right) \right] = \sum_{k=1}^3 \bar{m}_o \left(\bar{F}_k \right)$$

или в проекции на ось z

$$\frac{d}{dt} \left[m_z \left(\bar{m} \cdot V_{a\bar{o}c} \right) \right] = \sum_{k=1}^3 \bar{m}_z \left(\bar{F}_k \right).$$

Вычислив соответствующие моменты количества движения и моменты сил, получим

$$\frac{d}{dt} [m \cdot (\omega \cdot x)] = -(m \cdot g \cdot \cos \varphi) \cdot x + N \cdot x,$$

или

$$m \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot x + 2 \cdot m \cdot x \cdot \dot{\omega} = -(m \cdot g \cdot \cos \varphi) \cdot x + N \cdot x.$$

Последнее уравнение при равномерном вращении ротора дробилки $\omega = const$ и $\frac{d\omega}{dt} = 0$ даст выражение для

$$N = m \cdot g \cdot \cos \varphi + 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x},$$

что совпадает с (12).

При силе трения $F_{тр} = f \cdot N$ первое уравнение даёт уравнение относительного движения куска агломерата:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \omega \cdot f \cdot \dot{x} - \omega^2 \cdot x = -g \cdot \sin \varphi - f \cdot g \cdot \cos \varphi. \quad (13)$$

Особо отметим, что здесь угол φ следует принять отсчитываемым после начала относительного движения, т. е. $\varphi = \alpha_1 + \omega \cdot t$.

Дифференциальное уравнение (13), полученное с помощью уравнений Лагранжа, соответствует полученному ранее уравнению [8].

В таблице 1 приведены значения координат, скорости куска агломерата и углов положения плоскости зуба в зависимости от времени для различных угловых скоростей вращения ротора дробилки. Для значения времени 0,35 секунды при частоте вращения ротора дробилки $n = 12$ об/мин и коэффициенте трения $f = 0,5$ значение перемещения x становится меньше нуля, по-

этому в графе \dot{x} стоит прочерк в связи с отсутствием физического смысла.

Таблица 1

Значения координат, скорости куска агломерата и углов положения плоскости зуба
в зависимости от времени

$n = 6 \text{ об/мин}; f = 0,5$				$n = 12 \text{ об/мин}; f = 0,5$				$n = 6 \text{ об/мин}; f = 0,364$		
$t, \text{ с}$	$x, \text{ м}$	$\varphi, ^\circ$	$\dot{x}, \text{ м/с}$	$t, \text{ с}$	$x, \text{ м}$	$\varphi, ^\circ$	$\dot{x}, \text{ м/с}$	$t, \text{ с}$	$x, \text{ м}$	$\varphi, ^\circ$
0	0,6	27,799	0	0	0,6	31,518	0	0	0,6	21,302
0,1	0,5577	31,399	-0,8603	0,1	0,5584	38,712	-0,8204	0,1	0,5657	24,902
0,2	0,4299	34,999	-2,2170	0,2	0,4368	45,918	-1,6098	0,2	0,4648	32,102
0,35	0,079	40,399	-3,3087	0,35	-0,1063	56,718	-	0,35	0,1793	33,902

Из анализа полученных результатов следует, что снижение коэффициента трения сказывается на замедленном перемещении куска агломерата от периферии зуба звёздочки к центру вращения ротора.

Снижение коэффициента трения, например, ввиду повышения температуры агломерата при частично расплавленном его состоянии (около 800 °С), приводит к тому, что кусок начинает своё сползание при меньших в 1,2–1,3 раза углах наклона лопасти зуба.

С увеличением частоты вращения ротора угол, с которого начинается сползание куска, возрастает, что можно обосновать большим влиянием центробежной силы, отталкивающей материал от центра вращения.

В качестве меры недопущения сползания материала из зоны действия консольных колосников наиболее простым вариантом можно предложить создание механического упора на зубе, препятствующего выходу кусков под действием силы тяжести из зоны воздействия рабочих органов дробилки.

Выводы и направление дальнейших исследований. На основе уравнений Лагранжа подтверждена закономерность движения куска агломерата.

Представленные результаты исследований позволяют определить требуемую высоту консольных колосников в верхней части рабочей камеры дробильной машины для организации контакта с материалом, подлежащим дроблению, что способствует организации выбора рациональных параметров процесса диспергирования в многоступенчатой одновалковой зубчатой дробилке.

В перспективе дальнейшего расширения изучения рассматриваемого процесса предполагается учесть влияние изменения значения коэффициента трения в зависимости от скорости движения материала, а также выполнить экспериментальные исследования влияния установки механического упора, препятствующего сползанию материала с поверхности зуба, что обеспечит его дробление и в верхней части рабочей камеры.

Библиографический список

1. Левченко, О. А. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата [Текст] : монография / О. А. Левченко и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 190 с.
2. Борискин, И. К. Интенсивная механическая обработка агломерата. Теория, оборудование, технология [Текст] / И. К. Борискин, Г. А. Арыков, А. Н. Пыриков. — М. : МИСИС, 1998. — 248 с.
3. Готлиб, А. Д. Доменный процесс [Текст] / А. Д. Готлиб. — М. : Металлургия, 1966. — 504 с.
4. Рябчиков, М. Ю. Изучение подходов к оценке влияния механической прочности агломерата на эффективность доменного процесса [Текст] / М. Ю. Рябчиков, В. В. Гребенникова, Н. В. Богданов // Инновации в материаловедении и металлургии : материалы IV международной интерактивной научно-практической конференции. — Екатеринбург : изд-во Урал ун-та, 2015. — С. 269–272.

5. Морозова, Д. А. Влияние параметров доменной плавки на результаты работы доменных печей в условиях ОАО «Уральская сталь» [Текст] / Д. А. Морозова, А. Н. Шаповалов, М. Г. Потанов // Теория и технология металлургического производства. — 2015. — № 1 (16). — С. 26–29.

6. Мороз, В. В. Способ многостадийной обработки агломерата в одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко, Н. А. Бондарь // Современная металлургия нового тысячелетия : сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. — Липецк : Изд-во Липецкого гос. техн. ун-та, 2016. — С. 271–275.

7. Мороз, В. В. Инновационный способ многостадийной обработки агломерационного спека в одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко // Инновационные технологии в промышленности: образование, наука и производство : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Уфа : Нефтегазовое дело, 2016. — С. 398–400.

8. 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.

© Мороз В. В.

© Рубежанский В. И.

© Левченко Э. П.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛНУ им. В. Даля Замотой Т. Н.**

Статья поступила в редакцию 30.09.19.

**Мороз В. В., к.ф.-м.н. Рубежанский В. И., к.т.н. Левченко Э. П. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)
ДО ПИТАННЯ БАГАТОСТАДІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛУ В ОДНОВАЛКОВІЙ
ЗУБЧАСТІЙ ДРОБАРЦІ**

Виконано порівняльний аналіз можливості подання шматків агломерату зірочками ротора одновалкової зубчастої дробарки з метою забезпечення багатоступеневого дроблення на консульних колосниках та виявлення умов сповзання матеріалу по мірі його підйому у верхню частину робочої камери. На основі рівнянь Лагранжа підтверджено закономірність руху шматка агломерату по площини зуба зірочки дробарки.

Ключові слова: багатостадійна одновалкова зубчаста дробарка, рівняння Лагранжа, закон руху, аналітичний розрахунок, порівняльний аналіз.

**Moroz V. V., PhD in Physics and Mathematics Rubezhanskiy V. I., PhD in Engineering
Levchenko E. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)
THE QUESTION OF MULTISTAGE MATERIAL PROCESSING IN A SINGLE ROLL
CRUSHER**

There has been done a comparative analytical analysis of possibility of feeding the pieces of sinter by rotor sprockets of a single roll crusher to ensure multistage crushing on the cantilever grating and identify the conditions of material sliding as it lifted to the upper part of the operating chamber. Basing on Lagrange equation there has been proved the regularity of motion of a piece of sinter along the plane tooth surface of a crusher.

Key words: multistage single roll crusher, Lagrange equation, law of motion, analytical calculation, comparative analysis.

**СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**

**БУДІВНИЦТВО
І АРХІТЕКТУРА**

**CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE**

УДК 622.012.2:711.168

**к.т.н. Бондарчук В. В.,
Глушкина И. К.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)**

АКТУАЛЬНОСТЬ РЕНОВАЦИИ НЕДЕЙСТВУЮЩИХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ НА ПРИМЕРЕ ДОНБАССКОГО РЕГИОНА

На примере Донбасского региона рассмотрена проблема существования нефункционирующих угольных шахт, а также её решение за счёт реновации путём создания индустриального парка.

Авторами указаны основные факторы и региональные особенности, влияющие на выбор направления реновационной деятельности. Проведено исследование особенностей реновации предприятий угольной промышленности в условиях неопределённости рыночной конъюнктуры и дефицита финансовых ресурсов. Сформулированы принципы, являющиеся, по мнению авторов, важными для решения проблемы существования большого количества депрессивных регионов, испытывающих экономические и социальные проблемы, путём трансформации городского пространства.

Ключевые слова: реновация, промышленные предприятия, угольные шахты, индустриальный парк.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. На фоне активно развивающихся новых технологий угольная промышленность теряет свою актуальность, а здания промышленного комплекса зачастую находятся в неэксплуатируемом состоянии и занимают дорогостоящие земельные участки. При этом не осуществляют выпуск продукции и не предоставляют новые рабочие места. В связи с тем, что угольные шахты после полной выработки полезного ископаемого и предприятия с низкими технико-экономическими показателями подлежат закрытию, прослеживается тенденция образования в Донбассе депрессивных регионов, испытывающих экономические и социальные проблемы. Реновация деятельности закрывающихся угольных шахт является именно тем реконструктивным вариантом, который может решить не только проблему природоустройства, но и способно существенно изменить положение, превратив депрессивные регионы в процветающие и экономически привлекательные для инвесторов территории [1].

Постановка задачи. В соответствии с целью исследования в работе поставлены следующие задачи:

- провести анализ состояния предприятий угольной промышленности на современном этапе;
- исследовать особенности реновации предприятий угольной промышленности в условиях неопределённости рыночной конъюнктуры и дефицита финансовых ресурсов;
- обосновать методику формирования реновационных программ, в зависимости от региона;
- произвести оценку эффективности результатов реновации путём создания индустриального парка, конкретно взятого объекта (шахта им. Ильича в г. Стаханове).

Изложение материала и его результаты. Градостроительная деятельность на данном этапе, характеризующаяся переходом к рыночной экономике, определяет ряд присущих ей особенностей, среди которых: формирование рынка земли и недвижимости, изменение ролей заказчика, застройщика, проектировщика и городской администрации.

С одной стороны, планы и программы градостроительного развития не могут быть реализованы только за счёт государственных инвестиций — необходимо соз-

дать условия для внебюджетного финансирования. С другой стороны, необходимы изменения в области градостроительного регулирования, создающие условия для достижения баланса общественных и частных интересов, привлечения инвестиций и защиты интересов населения, для разнообразной социальной и деловой жизни [6].

На данном историческом этапе проект выступает в роли объекта политической и финансовой деятельности, а проектирование всё больше приближается к вектору, направленному на координирование прав различных участников градостроительного процесса. Исходя из этого, возникает необходимость усовершенствования методики проектирования за счёт согласования формы социальной и коммерческой адаптации градостроительного решения путём трансформации городского пространства.

Рассматривая вопрос градостроительной деятельности в средних и малых населённых пунктах, необходимо учитывать влияние определённых факторов, постепенно меняющих вектор развития промышленной архитектуры в рамках этих территорий. Внедряя в практику различные градостроительные программы (в рамках данной работы — программы реновационной деятельности), необходимо ориентироваться на решение ряда новых проблем, возникших на данном историческом этапе:

1. Формирование методики выбора программы реновационной деятельности с учётом региона её реализации.
2. Обеспечение реализации градостроительной политики в условиях острого дефицита финансовых ресурсов.
3. Сохранение архитектурной целостности городской среды с учётом широкого диапазона разрешённого использования определённых земельных участков, а также их трансформации.

Стратегические цели градостроительства связаны с устройством городов, служащих интересам местного населения. И для реализации данных целей необходимо прибегнуть к более гибким формам градо-

строительного планирования (в контексте данной работы — реновационным программам) в зависимости от региона их применения.

Рассматривая вопрос застройки и трансформации территории города, на данном историческом этапе наиболее важным является не постоянное отстаивание нормативного планирования, а учёт реальных процессов городской жизни конкретно взятого региона. В противном случае, проектирование будет всего лишь «прогулкой с целью догнать».

Очевидно, что специфика направлений реновационной деятельности должна определяться для каждого отдельного региона. В первую очередь это обусловлено различностью интересов градостроительной деятельности и необходимостью координации проектов различных масштабов между собой.

Для осуществления данной задачи необходимо объективное видение проблемы в целом, а также ряд системных решений, адаптированных для конкретных регионов.

Если говорить о формировании таких программ на региональном уровне, возникает вопрос потенциала малых и средних городов. Хотя такая постановка вопроса не совсем корректна. Любой город имеет потенциал развития, будь то малый или средний. Ошибочно полагаться на концепцию министерства экономического развития, когда остаётся в приоритете некоторое число крупных городов, а все остальные уничтожаются.

Градостроительные решения не должны быть типовыми, это всегда индивидуальные вещи, формирующиеся на основе региональных особенностей территории.

Градостроительная деятельность трансформировалась на каждом историческом этапе.

В советский период промышленные пространства располагались преимущественно на окраинах города в специально отведённых промышленных зонах. В связи с постоянным развитием города данные районы всё чаще преобразовывались в жи-

лые. В городской черте оказалось большое количество промышленных территорий, которые полностью или частично прекратили свою деятельность [7]. А это, в свою очередь, создало тенденцию образования депрессивных регионов, испытывающих экономические и социальные проблемы, вследствие чего возникла необходимость трансформации городского пространства.

Рациональное использование существующих резервов реструктуризированных угольных предприятий сделает возможным получение прибыли и обеспечит окупаемость вложенных финансов в минимальные сроки.

Анализ опыта различных стран, полученного при реновации промышленных территорий, отображается в ярких примерах, таких как Центр искусств и медиатехнологий в Карлсруэ, газгольдеры в Вене, высотный центр в Мельбурне, многофункциональный комплекс Xintiandi Factory в Гуанчжоу. В Германии, в городах Рурского бассейна, выполняются обширные работы по природообустройству в местах перепрофилирования крупных углепромышленных территорий. Там созданы четыре национальных парка, десятки «зелёных зон» отдыха, многие города заново озеленены. На территории шахт Бохума созданы большой ботанический сад, музей искусств, университетская библиотека. В России такими объектами являются Музей воды на территории предприятия «Водоканал» в Санкт-Петербурге, ЦСИ «Винзавод», завод «Красный Октябрь», арт-пространство завода «Кристалл» в Москве и т. д.

Исходя из вышеизложенного материала, следует, что реновация промышленных территорий является одной из наиболее актуальных тем в контексте развития территорий.

В подтверждение этого можно привести целый ряд предложенных инициатив ведущих специалистов в данной области. В частности, можно рассмотреть первую экспертную дискуссию, проходящую в рамках проекта редевелопмента «Пространство Кристалл», которая всесторонне исследо-

вала тему реновации промышленных территорий в постиндустриальной экономике.

Резюмируя всё вышесказанное, можно обозначить следующие направления городского трансформирования.

Основное направление реновации нацелено на редевелопмент зоны в пользу огромных жилых комплексов («Город на реке Тушино – 2018», завод «ЗИЛ», «Серп и молот», «Грайвороново» и т. д.) и создание парковых зон, поддерживающих программу, направленную на сохранение экологии.

Но однотипные решения на основе проектов крупных и крупнейших городов (в данном случае пример Москвы, который примерили на другие регионы) в отношении средних и малых городов неприменимы [8], так как для них необходимо учитывать, в числе прочего, реальные процессы и особенности городской жизни.

В связи с вышесказанным дальнейшее рассмотрение процессов реновации действующих угольных предприятий целесообразно вести, рассматривая город Стаханов, который является типовой составляющей градостроительного фонда Донбасского региона. На его территории, как и на территории всего Донбасского региона, львиная доля земли отдана под предприятия угольной промышленности, т. е. угольные шахты. Поэтому именно их стоит рассматривать как объект редевелопмента. [a](#)

Базируясь на проведённом исследовании архивных и статистических данных, углублённом анализе реализованных проектов реновации исчерпавших свой ресурс угольных шахт, можно определить наиболее целесообразные пути их ликвидации. [a](#)

Наиболее эффективным направлением реструктуризации является реновация, использующая наиболее щадящую форму преобразования промышленных объектов с изменением их функционального назначения, что, в свою очередь, делает возможным максимальное использование рекреационного потенциала нефункционирующих промышленных пространств.

В ходе исследовательской деятельности было выявлено, что процесс закрытия угольных шахт в Донбасском регионе требует больших материальных вложений, так как включает демонтаж старого оборудования, размонтировку линий электропередач и связи, герметизацию шахтных стволов и водоотливов, и, если средств для его реализации недостаточно, создаёт дополнительные проблемы для экономической обстановки в регионе. В то же время рациональное использование элементов материальной базы, оставшихся после закрытия шахт, создаёт благоприятные условия для существенных сдвигов в структуре занятости населения и помогает уравновесить диспропорцию между развитием градообразующих и градообслуживающих факторов.

Одним из наиболее рациональных путей выхода из сложившейся ситуации в Донбасском регионе, выявленных в ходе анализа, является создание новых предприятий на базе закрывающихся угольных шахт посредством реновации. В связи с этим возникает вопрос о выборе направленности производства и перспективах его развития. В процессе исследования одним из ключевых факторов в решении данного вопроса, помимо материальной базы, было проведение индустриализации с учётом предопределения качеств людей, которые находятся на тех или иных территориях. В Луганском и Донецком регионе для людей более привычным является индустриальное производство [5].

Примером реновации может являться шахта им. Ильича в г. Стаханове Луганского региона. Ближайшими населёнными пунктами являются города: Алчевск, Брянка, Луганск. Соседними действующими предприятиями являются: шахты «Никанор-Новая», «Ломоватская» и завод ферросплавов, а также сельскохозяйственные предприятия вышеперечисленных городов и прилегающих посёлков городского типа.

Шахта им. Ильича связана железнодорожной веткой через станцию Щётово с магистралью Дебальцево – Зверево. Автострада Киев – Харьков – Ростов пересекает

поле в западной части с северо-запада на юго-восток. Асфальтовые дороги местного значения проведены непосредственно к шахте и населённым пунктам.

Электроснабжение шахты осуществлялось от двух подстанций «Донбасс-энерго».

Основными отраслями народного хозяйства являются угледобывающая промышленность и сельское хозяйство. Находясь в промышленно освоенном районе Донбасса, территория занимает выгодное положение в отношении подъездных железнодорожных путей, автодорог, электро-снабжения и водоснабжения.

Автомобильными дорогами шахта связана с городами: Брянка, Алчевск, Луганск. Фланговые площадки связаны автомобильными дорогами с твёрдым покрытием между собой и с населёнными пунктами.

Для принятия решения по использованию территории было проведено техническое обследование (рис. 1). На территории угольного предприятия большая часть строений не пригодна для использования по назначению. Исходя из этого, упор необходимо делать на сохранившуюся инфраструктуру и огромный земельный участок, в то время как дооборудование, восстановление и новое строительство потребуют куда меньше капиталовложений.

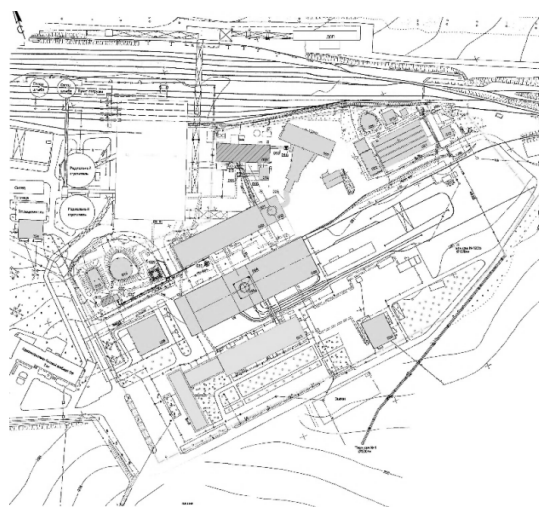


Рисунок 1 Центральная промплощадка шахты им. Ильича в г. Стаханове в период функционирования до закрытия

Как видно из генерального плана центральной части промплощадки и исходя из результатов технического обследования, неэксплуатируемые здания и сооружения, находящиеся на территории недействующих шахт, после реконструкции и дооборудования могут быть использованы как элементы индустриального парка.

Топливные резервуары могут и должны быть использованы для генераторов автономного электропитания, на базе шахт имеются готовые системы водоснабжения, водоотведения и отопления.

Территория недействующего предприятия шахты имеет подвод двух цепей электрических линий, а их опоры рассчитаны на повышенные ветровые и гололёдные нагрузки. Кабельные линии проложены по отдельным трассам, питание которых осуществляется от независимых источников. Шахтный производственный комплекс имени Ильича в г. Стаханове располагается вблизи природных водоёмов. Воду из них рационально будет использовать в системах охлаждения индустриального парка, одновременно решая проблему откачки шахтных вод, которая является едва ли не основной.

Связь с другими промышленными единицами города осуществляется посредством развитой транспортной инфраструктуры, и выгодное местоположение даст возможность обеспечить взаимодействие со всеми промышленными предприятиями города (рис. 2).

Рассматривая вторую по величине промплощадку шахты им. Ильича, стоит отметить, что в начале 2000-х она уже была использована в качестве промплощадки проекта под мусоросжигательный завод (расположение территории далеко за пределами города и современные очистные фильтры сделали возможным разработку такого рода проекта). Данный проект осуществлялся с привлечением инвесторов из Китая и даже был утверждён для строительства. Но на последнем этапе согласования, в связи с конфликтом властей, проект закрыли.

Возвращаясь к теме индустриального парка как нового структурного звена в гра-

достроительной ситуации, работа которого направлена на развитие промышленного потенциала региона, привлечение трудовых, материальных ресурсов и инвестиций, на формирование и реализацию программ развития промышленности региона, необходимо особое внимание уделить целеполаганию работы с территорией [4].

Важным аспектом формирования программы трансформации территории промышленного предприятия является учёт её особенностей. Исходя из этого, можно выделить три основных направления, которых необходимо придерживаться, проводя реновацию недействующего угольного предприятия:

1. При сохранении 70 % и более всех составляющих элементов промышленной площадки и удовлетворительном их состоянии с точки зрения эксплуатации, а также при непосредственной близости к металлургическим комбинатам, заводам и т. д. данная территория может и должна быть переоборудована под комплекс складов. Это решит проблему недостающих земельных участков для хранения продукции, изготавливаемой предприятиями ЛНР.

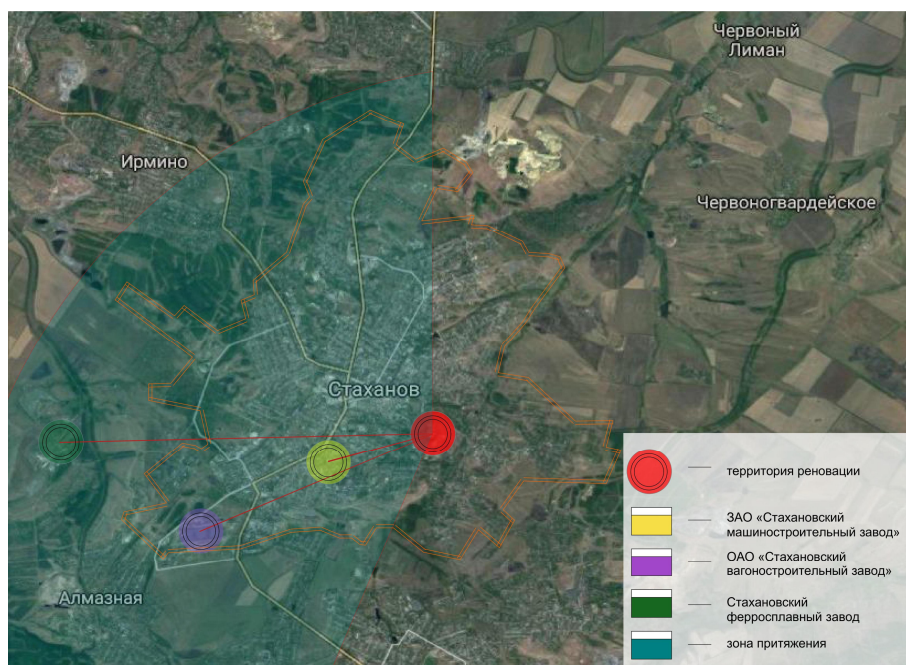
2. На территории индустриального парка могут располагаться производственные зоны, где могут быть размещены ремонтные мастерские, а также небольшие заводы, к примеру, завод по изготовлению металлопрофиля, керамической плитки или панелей. Для реализации этого направления необходима связь с другими функционирующими промышленными предприятиями. В данном случае существует связь с Алчевским металлургическим комбинатом (например, Китай пошёл по пути создания производственных зон — предприятий, создающих занятость и снижающих уровень давления миграционного потока из малых городов в большие [2]).

3. Расположение перерабатывающего комбината при минимальном сохранении зданий и сооружений. Основной упор необходимо сделать как раз не на сохранившиеся постройки, а на существующие коммуникации, земельный участок и терриконы, которые

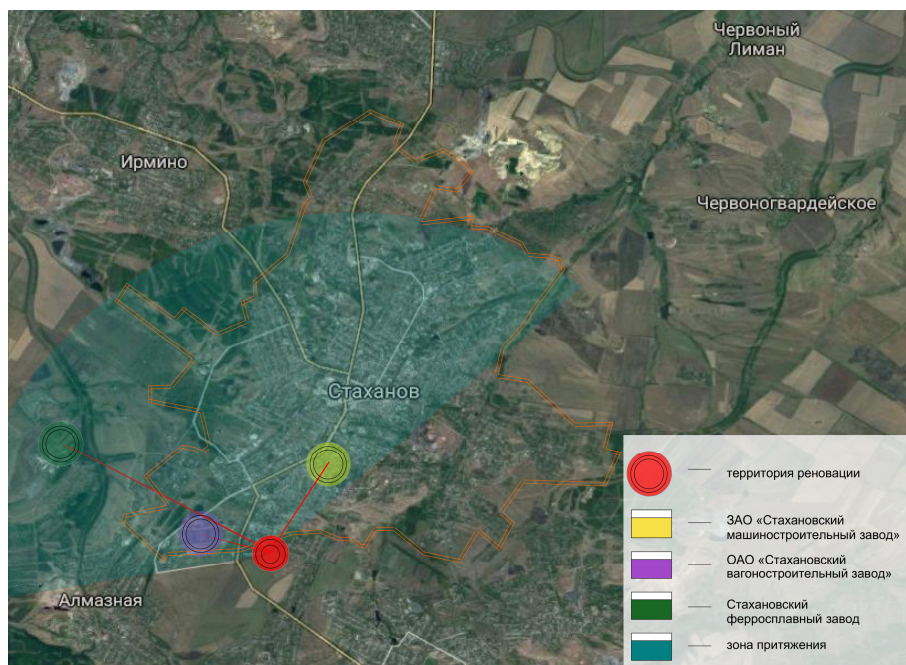
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

обладают большими перспективами (рис. 3). Сохранение всего комплекса зданий, входящих в состав промышленной площадки не обязательно, т. к. возведение нового и дооб-

рудование сохранившихся и пригодных к эксплуатации построек менее затратно и окупаемость происходит в кратчайшие строки при условии налаженного производства.



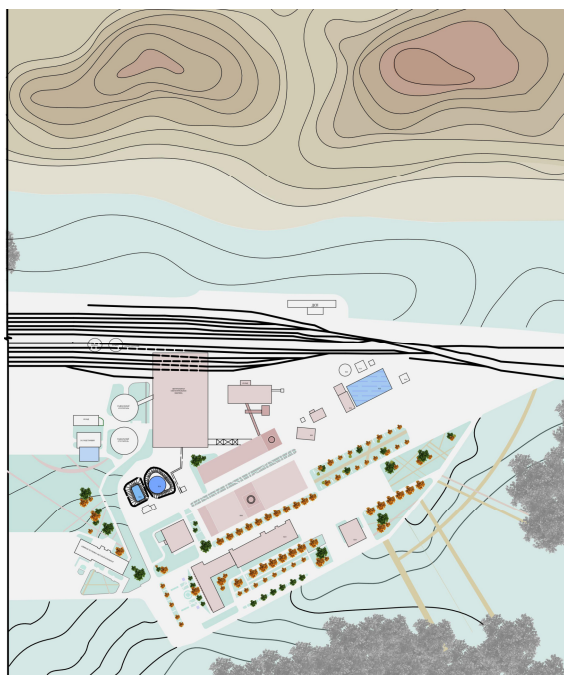
а



б

Рисунок 2 Зона притяжения: а) центральной промплощадки шахты им. Ильича; б) второй по величине промплощадки шахты им. Ильича

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



Экспликация зданий и сооружений

№ № площа- док	N по ген- плану	Наименование	Примечание
01	001	Главный ствол	существующий
	002	Башенный копер главного ствола	существующий
	003	Надшахтное здание главного ствола	существующее
	004	Вспомогательный ствол	существующий
	005	Башенный копер вспомогательного ствола	существующий
	006	Надшахтное здание вспомогательного ствола	существующее
	007	Здание вентиляторной установки ВЦД-47У	разбирается
	008	Вентиляционный канал	существующий
	009	Котельная	реконструкция
	010	Конвейерная галерея № 1	существующая
	011	Конвейерная галерея № 2	существующая
	012	Склад угля с навесом	существующий
	013	Эстакада шлакоудаления	существующая
	014	Станция погрузки шлама	существующая
	015	Противопожарно-производственный резервуар емк. 1000 м ³	существующий
	016	Противопожарно-производственный резервуар емк. 2000 м ³	существующий
	017	Насосная станция хозяйственно-питьевого и противопожарно-производственного водоснабжения	реконструкция
	018	Фильтровально-насосная станция	существующая
	019	Хлораторная	существующая
	020	Резервуар очищенной воды емк. 1000 м ³	существующий
	021	Отстойник шахтных вод емк. 3000 м ³	существующий
	022	Градирия	существующая
	023	АБК	дособорудование
	024	Столовая	существующая
	025	ТПП №1 110/6 кВ	существующая
	026	ТПП №2 110/6 кВ	существующая
	027	Теплотрасса от котельной к калиферной	существующая
	028	Внутриплощадочные сети	существующие

Рисунок 3 Генеральный план промышленного предприятия (нефункционирующая шахта им. Ильича, г. Стаханов)

Рассмотрев вопросы, связанные с формированием объёмно-планировочных решений направленности индустриального парка, можно сделать вывод, что для рассматриваемой территории наиболее целесообразным является возведение перерабатывающего комбината. Именно данный вариант трансформации промышленного пространства, расположенного в городской среде, позволит решить проблему пустующих территорий, недостатка рабочих мест для молодых специалистов, а также создаст условия для притока инвесторов в регион.

В продолжение темы об использовании территорий недействующих угольных предприятий, в частности использовании сохранившихся коммуникаций, и в подтверждение идеи рентабельности подобных проектов могут выступать водоотливные комплексы ГУП ЛНР «Углереструктуризация» (рис. 4), основная цель деятельности которых — реализация государственной политики ЛНР в сфере реструктуризации убыточных и неперспективных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий, направленная на организацию и контроль выполнения работ и

мероприятий согласно проектам ликвидации, в том числе предотвращение подтопления действующих шахт и территорий городов и посёлков.

Данный проект является ярким примером удачной трансформации городского пространства, т. к., помимо обеспечения технической безопасности, трансформирует убыточную территорию в экономически независимую путём получения очищенной воды для технических и хозяйственно-питьевых нужд, получая при этом прибыль.

Наряду с территорией недействующих угольных предприятий целесообразно использовать терриконы угольных шахт, которые могут стать центром вторичной переработки отвалов [3]. Согласно продолжительным исследованиям МакНИИ в этой области, является возможным дополнительное выделение из терриконов шахт редкоземельных элементов, при этом их концентрация в отвальной породе составляет в среднем 230–260 г/т. Исходя из этого, в недрах среднего донбасского террикона массой чуть более 2 млн тонн скрываются редкоземельные металлы, по общей оценке, на 100 млн долларов [3].



Рисунок 4 Карта расположения водоотливных комплексов ГУП ЛНР «Углереструктуризация»

Согласно проведённым исследованиям, вариантов использования терриконов масса. Породы терриконов и отвалы можно использовать для получения глинозёма, из которого выплавляют алюминий. В случае использования породы для производства кирпича, строительных плит, стальных панелей и другого это позволит компаниям удешевить стоимость строительства как минимум на 15–20 %. Породы терриконов может быть использована при строительстве дорог (реализация данного опыта до вооружённого конфликта осуществлялась в Донецке).

Создание индустриальных парков является хорошей поддержкой именно моногородов, для которых сохранение промышленности и возведение её на новый уровень более рентабельно и целесообразно, чем возведение жилых комплексов на данной территории.

Донбасский регион обладает серьёзным промышленным потенциалом, способст-

вующим развитию именно промышленной архитектуры (как путём трансформации существующего пространства, так и созданием новых промышленных единиц), что создаст площадки и условия для работы инвесторов, в том числе иностранных.

Выводы и направление дальнейших исследований. На примере Донбасского региона была рассмотрена проблема существования нефункционирующих угольных шахт, а также предложен один из вариантов её решения путём трансформации городского пространства за счёт реновации посредством создания индустриального парка. Предложена система разработки реновационных программ в зависимости от региона их применения.

Создание новых предприятий путём реновации недействующих угольных шахт позволит обеспечить развитие социальной инфраструктуры благодаря созданию новых рабочих мест и приведёт к притоку средств инвесторов.

Библиографический список

1. Беккер, В. Я. Реорганизация производственных территорий [Текст] / В. Я. Беккер, В. В. Карелина // *Архитектура и строительство Москвы : журнал комплекса архитектуры, строительства, развития и реконструкции города*. — 2008. — № 5–6. — С. 47.
2. Бузунов, К. В. Основные направления перепрофилирования промышленных зданий в Китае [Текст] / К. В. Бузунов // *Академический вестник УралНИИПроект РААСН*. — 2012. — № 2. — С. 70–73.
3. Воронцов, И. Золотые терриконы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.minprom.ua/articles/86350.html>.
4. Индустриальные парки : перспективное направление [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://commercialproperty.ua/cp-articles/industrialnye-parki-perspektivnoe-napravlenie/>.
5. Инвестирование Донбасса бизнесменами из Европы начнётся с Луганска [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://miaistok.ru/investirovanie-donbassa-biznesmenami-iz-evropy-nachnyotsya-s-luganska/>.
6. Крашенинников, А. В. Градостроительное развитие жилой застройки [Текст] / А. В. Крашенинников. — М. : Архитектура-С, 2005. — 107 с.
7. Реабилитация промышленных территорий как части городского пространства [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/reabilitatsiya-promyshlennyh-territoriy-kak-chasti-gorodskogo-prostranstva>.
8. Территория Московского завода «Кристалл» открылась в новом качестве [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.architekt.ru/media/1489/?print=1>.

© Бондарчук В. В.

© Глушкина И. К.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ПГС и А
ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я.,
к.т.н., доц., и.о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.*

Статья поступила в редакцию 11.10.19.

к.т.н. Бондарчук В. В., Глушкіна І. К. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

АКТУАЛЬНІСТЬ РЕНОВАЦІЇ НЕДІЮЧИХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ НА ПРИКЛАДІ ДОНБАСЬКОГО РЕГІОНУ

На прикладі Донбаського регіону розглянуто проблему існування нефункціонуючих вугільних шахт, а також її рішення за рахунок реновації шляхом створення індустріального парку.

Авторами вказано основні чинники і регіональні особливості, що впливають на вибір напрямку реноваційної діяльності. Проведено дослідження особливостей реновації підприємств вугільної промисловості в умовах невизначеності ринкової кон'юнктури і дефіциту фінансових ресурсів. Сформульовано принципи, які є, на думку авторів, важливими для вирішення проблеми існування великої кількості депресивних регіонів, що відчувають економічні та соціальні проблеми, шляхом трансформації міського простору. Розглянуто вітчизняний та зарубіжний досвід, отриманий при реновації промислових територій. Проаналізовано питання рентабельності і доцільності інвестування в промисловість ЛНР на даному етапі.

Ключові слова: *реновація, промислові підприємства, вугільні шахти, індустріальний парк.*

PhD in Engineering Bondarchuk V. V., Glushkina I. K. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

RELEVANCE OF RENOVATION OF NON-OPERATING COAL MINES ON THE EXAMPLE OF THE DONBASS REGION

On the example of the Donbass region, there has been examined the problem of the existence of non-operating coal mines, as well as its solution through renovation, by creating an industrial park.

The authors indicate the main factors and regional peculiarities that affect the choice of direction of renovation activities. Studying the peculiarities of renovation of the collieries within the conditions of uncertainty of the market situation and lack of financial resources was carried out. There have been stated the principles, which, in the author's opinion, are important for resolving the problem of the existence of a large number of the depressed regions experiencing economic and social problems, through the transformation of urban space. Native and foreign experience obtained during renovation of the industrial areas is considered. The question of profitability and practicability of investment in the LPR industry at this stage is analyzed.

Key words: *renovation, industrial enterprises, coal mines, industrial park.*

УДК 69:624.012.45

к.т.н. Емец Е. В.,
Никишина И. А.,
Коняшкина О. А.

(ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», Алчевск, ЛНР)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОГО МАССИВА, РАСПОЛОЖЕННОГО ВБЛИЗИ ОТКОСОВ

Приведены результаты исследования устойчивости грунтового массива, расположенного вблизи откоса, с использованием ПК «ЛИРА», предложены мероприятия по повышению устойчивости откосов.

Ключевые слова: устойчивость, грунтовый массив, оползни, откосы, моделирование, смещение грунтовых массивов, поверхности скольжения.

Актуальность проблемы. Потеря устойчивости части грунтового массива, сопровождающаяся разрушением сооружений, связана с формированием в массиве областей, где прочность грунта оказывается исчерпанной [1, 2].

Основными причинами потери устойчивости откосов и склонов являются:

- устройство недопустимо крутого откоса или подрезка склона, находящегося в состоянии, близком к предельному;

- увеличение внешней нагрузки (возведение сооружений, складирование материалов на откос или вблизи его бровки);

- изменение внутренних сил (изменение удельного веса грунта при изменении его влажности);

- неправильное назначение расчётных характеристик прочности грунта или снижение его сопротивления сдвигу за счёт повышения влажности и других причин;

- проявление гидродинамического давления, сейсмических сил, различного рода динамических воздействий (движение транспорта, забивка свай и т. п.) [3].

Оценка устойчивости массива грунтов основывается на анализе напряжений, возникающих в них от собственного веса и проектируемого сооружения, и сопоставлений с предельными их значениями.

Условие предельного равновесия в точке грунтового массива характеризуется

следующими выражениями теории предельного равновесия:

– для песка:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \sin \varphi; \quad (1)$$

– для глинистого грунта:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi. \quad (2)$$

Эти выражения позволяют дать оценку напряжённого состояния грунта, т. е. установить, находится ли грунт в допредельном или предельном состоянии, а следовательно, насколько устойчив массив.

Современное строительство в сложных инженерно-геологических условиях ставит более сложные задачи, связанные с количественной оценкой смещений грунтовых массивов. Решение таких задач возможно только на основании учёта упруго-пластического состояния грунтовых массивов, которое предшествует возникновению оползня.

Моделирование работы грунтовых массивов и расчёт их с использованием ПК «ЛИРА» позволяет обеспечить массивную обработку данных, исследовать деформации грунта, получить значения напряжений и перемещений в любой точке грунтового массива, определить возможную поверхность скольжения и, как следствие, оценить устойчивость склона.

Основная часть. Для моделирования оползневого массива применяется программный комплекс ПК «ЛИРА-САПР», в основу которого положен метод конечных элементов [4–6]. Результаты расчёта устойчивости грунтового массива с использованием ПК «ЛИРА» сравнивали с результатами расчёта по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

Методика расчётов. В проектной практике применяются инженерные методы, содержащие различные упрощения [7].

Наиболее распространён метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения

Суть метода заключается в анализе устойчивости склона против сдвига по ряду возможных поверхностей скольжения, представленных дугой окружности с радиусом r и центром в точке O .

Согласно этому методу предполагается, что потеря устойчивости откоса может произойти в результате вращения отсека грунтового массива относительно некоторого центра.

На разрезе откоса, вычерченном в определённом масштабе, наносится серия возможных цилиндрических поверхностей скольжения (рис. 1).

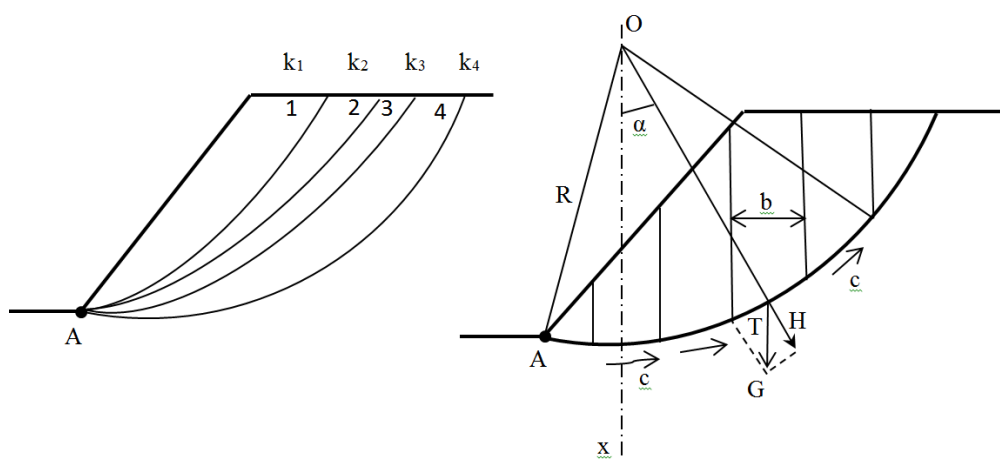


Рисунок 1 Схемы к расчёту устойчивости откоса

Отсек грунтового массива, ограниченный свободной поверхностью и поверхностью скольжения, разбивается вертикальными линиями на n элементов таким образом, чтобы можно было принять основание каждого отсека плоским, а прочностные характеристики постоянными.

Смещающийся массив рассматривается как недеформируемый отсек, все точки которого участвуют в общем движении.

Коэффициент устойчивости принимается в виде

$$k_{st} = \frac{M_{sr}}{M_{sa}}. \quad (3)$$

где M_{sr} и M_{sa} — моменты относительно центра вращения т. О всех сил, соответственно удерживающих и смещающих отсек.

Порядок вычислений:

1. Грунтовой массив разбивается на отдельные элементы.

2. Вычисляются вертикальные силы, действующие на каждый элемент: собственный вес грунта P_{gi} и равнодействующая нагрузки на его поверхности P_{qi} .

3. Равнодействующая сил $P_{gi} + P_{qi}$ раскладывается на нормальную N_i и касательную T_i составляющие:

$$N_i = (P_{gi} + P_{qi}) \sin \alpha_i. \quad (4)$$

4. Находим c и l_i — длину дуги.

Момент сил, вращающих отсек вокруг т. О:

$$M_{sa} = r \sum_{i=1}^n T_i = r \sum_{i=1}^n (P_{gi} + P_{qi}) \sin \alpha_i, \quad (5)$$

где n — число элементов в отсеке.

Сила трения:

$$\begin{aligned} T_i &= N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i = \\ &= (P_{gi} + P_{qi}) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i, \end{aligned} \quad (6)$$

где α — угол между нормалью к основанию i -го элемента и вертикалью;

$$l_i = \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \text{ — длина основания } i\text{-го эле-}$$

мента, где b_i — ширина i -го отсека; φ_i и c_i — расчётные значения характеристик прочности грунта в пределах основания i -го элемента.

$$k_{st} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum_{i=1}^n c_i l_i}{\sum_{i=1}^n P_i \sin \alpha_i}. \quad (7)$$

При $k_{st} \geq k_{st}^H$ устойчивость откоса относительно выбранного центра вращения т. О обеспечена.

Коэффициент устойчивости часто принимается в виде

$$k_{st} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi'} = \frac{c}{c'}. \quad (8)$$

Для расчёта моделируем нелинейное нагружение оползневого массива. Применяем шагово-итерационный метод.

Результаты расчёта (напряжения и перемещения в каждой точке грунтового массива) сопоставлены с результатами расчёта по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

Опаснейшей будет поверхность, для которой коэффициент устойчивости получится минимальным. Для обеспечения устойчивого положения откоса минимальный коэффициент устойчивости должен быть не менее 1,5. Если он окажется меньшим, необходимо сделать откос более пологим и повторить расчёты.

Результаты расчётов. Определение поверхности скольжения по методу круглоцилиндрических поверхностей предусматривает выполнение следующих шагов:

шаг 1: высота откоса 10,7 м; угол откоса 45° ; грунтовый откос разбиваем на 10 отсеков, каждый из которых шириной 1,67 м, расстояние от т. А до нейтральной оси 3,374 м (рис. 2);

шаг 2: высота откоса 10,7 м; угол откоса 45° ; грунтовый откос разбиваем на 10 отсеков, каждый из которых шириной 2,114 м, расстояние от т. А до нейтральной оси 5,798 м;

шаг 3: высота откоса 10,7 м; угол откоса 45° ; грунтовый откос разбиваем на 10 отсеков, каждый из которых шириной 2,889 м, расстояние от т. А до нейтральной оси 8,061 м.

Вес каждого из отсеков раскладываем на составляющие силы. Результаты расчёта приведены в таблице 1.

В результате расчёта получили, что откос из мягкопластичной глины устойчив при радиусе поверхности скольжения, не превышающем 16,7 м (рис. 2).

Для моделирования оползневого массива в программном комплексе «ПК ЛИРА-САПР» применялись конечные элементы плоской деформации грунтов (КЭ 281, 282, 284).

Расчёт производится шагово-итерационным методом, что позволяет учитывать перераспределение напряжений вследствие пластических деформаций грунта.

Моделируем вертикальный грунтовый откос. При этом были приняты следующие условия (рис. 3):

1) однородный грунт с характеристиками: модуль деформации $E = 20000 \text{ т} / \text{м}^2$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$; удельный вес $\gamma = 18 \text{ кН} / \text{м}^3$; удельное сцепление $C_n = 55,4 \text{ кПа}$; угол внутреннего трения $\varphi_n = 19,2^\circ$;

2) условия закрепления:

– по вертикальным боковым граням вырезанного массива запрещены горизонтальные перемещения;

– по нижней горизонтальной грани вырезанного массива запрещены вертикальные перемещения.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

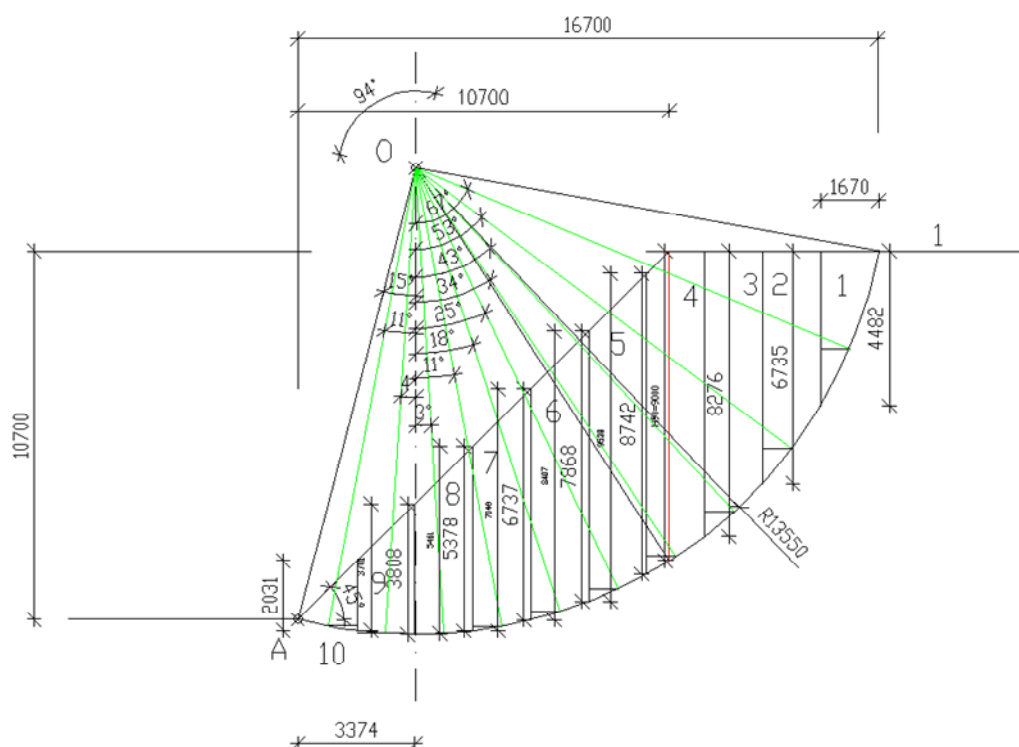


Рисунок 2 Расчётная схема грунтового массива по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения

Таблица 1

Результаты расчёта

Вес отсеков грунта, $G_i, \text{кН} / \text{м}$	Сдвигающая сила $T = G \sin \alpha, \text{кН} / \text{м}$	Нормальная составляющая веса $N = G \cos \alpha, \text{кН} / \text{м}$
шаг 1		
67,32	$T_1 = 67,32 \times \sin 67 = 61,968$	$N_1 = 67,32 \times \cos 67 = 26,3$
168,58	$T_2 = 168,58 \times \sin 53 = 134,63$	$N_2 = 168,582 \times \cos 53 = 101,454$
255,594	$T_3 = 255,594 \times \sin 43 = 174,31$	$N_3 = 255,594 \times \cos 43 = 186,93$
254,304	$T_4 = 254,304 \times \sin 34 = 142,205$	$N_4 = 254,304 \times \cos 34 = 210,82$
249,624	$T_5 = 249,624 \times \sin 25 = 105,495$	$N_5 = 249,624 \times \cos 25 = 226,23$
219,492	$T_6 = 219,492 \times \sin 18 = 67,826$	$N_6 = 219,492 \times \cos 18 = 208,75$
182,07	$T_7 = 182,07 \times \sin 11 = 34,74$	$N_7 = 182,07 \times \cos 11 = 178,72$
138,024	$T_8 = 138,024 \times \sin 3 = 7,22$	$N_8 = 138,024 \times \cos 3 = 137,83$
90,954	$T_9 = 90,954 \times \sin 4 = 17,354$	$N_9 = 90,954 \times \cos 4 = 89,28$
30,51	$T_{10} = 30,51 \times \sin 15 = 7,89$	$N_{10} = 30,51 \times \cos 15 = 29,47$
	$\sum T = 753,638$	$\sum N = 1395,784$
Коэффициент устойчивости:		
$k_{ycm} = \frac{55,4 \times 22,17 + tg 19,2^\circ \times 1395,784}{753,938} = 2,27 > 1,5$		

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Продолжение таблицы 1

Вес отсеков грунта, $G_1, \text{кН} / \text{м}$	Сдвигающая сила $T = G \sin \alpha, \text{кН} / \text{м}$	Нормальная составляющая веса $N = G \cos \alpha, \text{кН} / \text{м}$
шаг 2		
89,406	$T_1 = 89,406 \times \sin 64 = 80,357$	$N_1 = 89,406 \times \cos 64 = 39,193$
226,35	$T_2 = 226,35 \times \sin 50 = 173,394$	$N_2 = 226,35 \times \cos 50 = 145,495$
309,31	$T_3 = 309,31 \times \sin 39 = 194,655$	$N_3 = 309,31 \times \cos 39 = 240,379$
365,79	$T_4 = 365,79 \times \sin 30 = 182,895$	$N_4 = 365,79 \times \cos 30 = 316,783$
402,57	$T_5 = 402,57 \times \sin 22 = 150,805$	$N_5 = 402,57 \times \cos 22 = 373,256$
385,48	$T_6 = 385,48 \times \sin 14 = 93,256$	$N_6 = 385,48 \times \cos 14 = 374,03$
318,83	$T_7 = 318,83 \times \sin 6 = 33,326$	$N_7 = 318,83 \times \cos 6 = 317,083$
238,98	$T_8 = 238,98 \times \sin 8 = 33,326$	$N_8 = 238,98 \times \cos 8 = 236,654$
149,38	$T_9 = 149,38 \times \sin 10 = 25,939$	$N_9 = 149,38 \times \cos 10 = 147,11$
52,845	$T_{10} = 52,845 \times \sin 17 = 15,45$	$N_{10} = 52,845 \times \cos 17 = 50,536$
	$\sum T = 983,33$	$\sum N = 2240,519$
Коэффициент устойчивости: $k_{уст} = \frac{55,4 \times 26,86 + \operatorname{tg} 19,2^\circ \times 2240,519}{983,336} = 2,3 > 1,5$		
шаг 3		
105,066	$T_1 = 105,066 \times \sin 54 = 85$	$N_1 = 105,066 \times \cos 54 = 61,756$
281,673	$T_2 = 281,674 \times \sin 43 = 192,101$	$N_2 = 281,674 \times \cos 43 = 206,003$
405,213	$T_3 = 405,213 \times \sin 34 = 226,592$	$N_3 = 405,213 \times \cos 34 = 335,936$
494,945	$T_4 = 494,945 \times \sin 26 = 216,969$	$N_4 = 494,945 \times \cos 26 = 444,853$
558,791	$T_5 = 558,791 \times \sin 19 = 181,924$	$N_5 = 558,791 \times \cos 19 = 528,347$
600,38	$T_6 = 600,859 \times \sin 12 = 124,925$	$N_6 = 600,859 \times \cos 12 = 587,728$
589,281	$T_7 = 589,281 \times \sin 5 = 51,359$	$N_7 = 589,281 \times \cos 5 = 587,038$
444,98	$T_8 = 444,98 \times \sin 2 = 15,529$	$N_8 = 444,98 \times \cos 2 = 444,708$
281,957	$T_9 = 281,957 \times \sin 9 = 44,107$	$N_9 = 281,957 \times \cos 9 = 278,485$
97,291	$T_{10} = 97,291 \times \sin 16 = 26,817$	$N_{10} = 97,291 \times \cos 16 = 93,522$
	$\sum T = 1165,323$	$\sum N = 3568,376$
Коэффициент устойчивости: $k_{уст} = \frac{55,4 \times 33,376 + \operatorname{tg} 19,2^\circ \times 3568,376}{1165,323} = 2,65 > 1,5$		

Размер области моделирования выбирался таким образом, чтобы потенциально возможная зона оползания находилась в пределах моделируемой области.

Размер конечных элементов варьировался в пределах от 2 до 0,5 м.

В результате расчёта устойчивости грунтового массива с использованием ПК «ЛИРА» получили значения перемещений, изополя напряжений в точках оползневого массива и расположение кривой скольжения, которые показаны на рисунке 4.

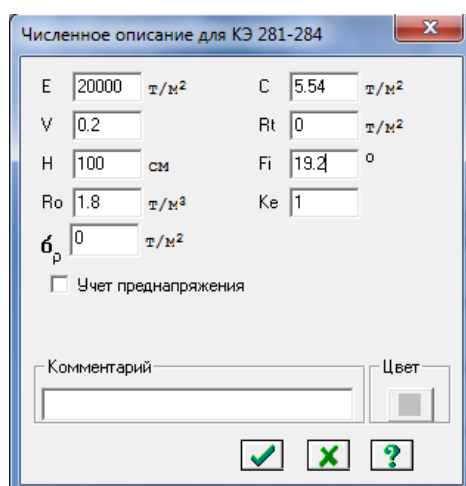


Рисунок 3 Моделирование грунтовых условий в ПК «ЛИРА»

В результате расчёта установлено, что радиус поверхности скольжения грунтового массива составляет 23 м.

В результате сравнения кривых скольжения по МКЭ в ПК «ЛИРА» и по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения установлено, что второй метод значительно завышает значения устойчивости (расхождение составляют почти 20 %).

Мероприятия по повышению устойчивости откосов и склонов. Одним из наиболее эффективных способов повышения устойчивости откосов и склонов является создание уступчатого профиля с образованием горизонтальных площадок (берм) по высоте откоса (рис. 5).

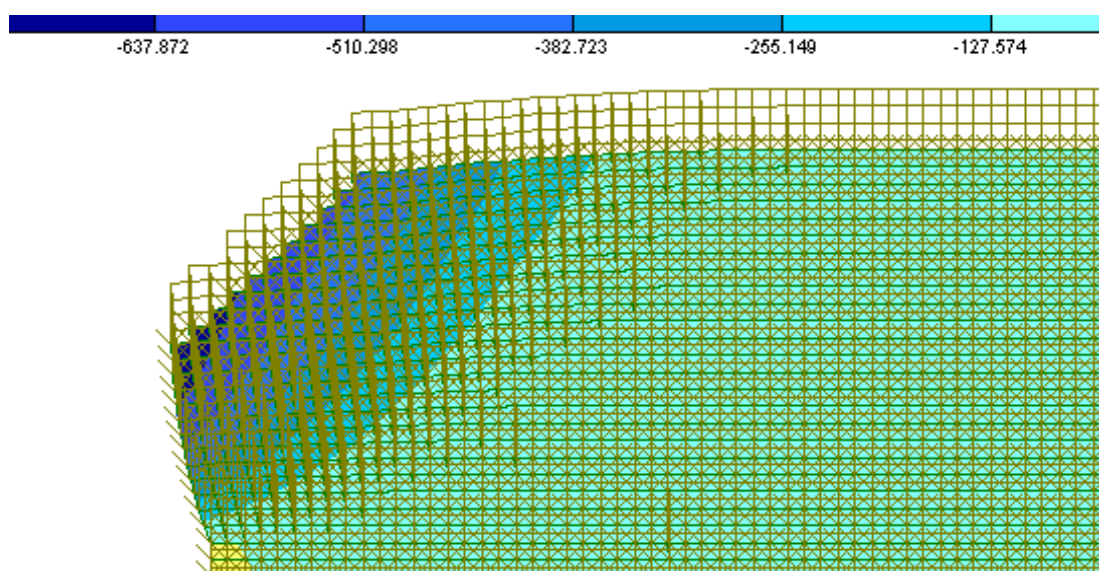
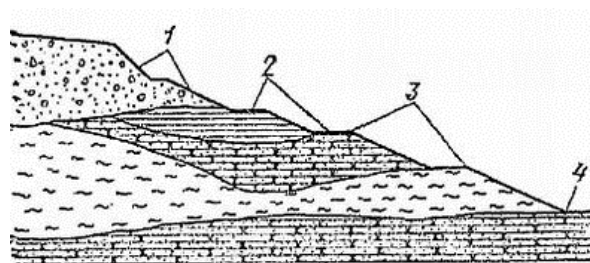


Рисунок 4 Перемещения по оси X, см

При относительно небольшой высоте откоса эффективна пригрузка подошвы в его нижней части или устройство подпорной стенки, поддерживающей откос. Закрепление поверхности откоса может быть осуществлено мощением камнем, укладкой бетонных плит.

Важнейшим мероприятием является регулирование гидрогеологического режима откоса или склона: устройство канав для перехватывания поверхностных вод, отвод воды с берм, устройство дренажа.



1 — уступ, 2 — берма, 3 — бровка уступа, 4 — подошва откоса

Рисунок 5 Откос уступчатой формы

Повышению устойчивости также способствуют такие конструктивные мероприятия, как прорезания потенциально неустойчивого массива грунтов системой забивных или набивных свай, анкерное закрепление во взаимодействии с подпорными стенками или свайными конструкциями.

Выводы:

1. Определены особенности моделирования грунтовых массивов при помощи физически нелинейных элементов.

2. Установлены преимущества прогнозирования устойчивости грунтового массива с использованием ПК «ЛИРА», заключающиеся в точности получаемых результатов.

3. В результате сравнения кривых скольжения по МКЭ в ПК «ЛИРА» и по методу круглоцилиндрических поверхно-

стей скольжения установлено, что метод скольжения завышает значения устойчивости почти на 20 %.

4. В результате расчёта модели грунтового основания со зданием, строящимся вблизи откосов, при помощи метода цилиндрических поверхностей скольжения было установлено, что откос из глины мягкопластичной устойчив для расчётных плоскостей скольжения и составил $k_{уст} = 2,27 > 1,5$ — для угла скольжения в 94° ; $k_{уст} = 2,3 > 1,5$ — для угла скольжения 97° ; $k_{уст} = 2,65 > 1,5$ — для угла скольжения 79° .

5. Предложены мероприятия по повышению устойчивости откосов и склонов.

Библиографический список

1. Методы расчёта и исследования зданий и оснований на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах [Текст] : сб. науч. тр. — К. : НИИСК Госстроя СССР, 1990. — 140 с.
2. Ройтман, А. Г. Деформации и повреждения зданий [Текст] / А. Г. Ройтман. — М. : Стройиздат, 1987. — 160 с.
3. Дружакина, О. П. Устойчивость грунтовых массивов [Текст] : учеб.-метод. пособие / О. П. Дружакина, К. В. Гаврилова. — Ижевск : Удмуртский университет, 2012. — 68 с.
4. Кириак, К. К. Геомеханический анализ вероятности потери устойчивости оползневого склона методом конечных элементов [Текст] / К. К. Кириак // Проблеми розвитку міського середовища. — 2014. — Вип. 2. — С. 281–297.
5. Метод конечных элементов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>.
6. Гензерский, Ю. В. ЛИРА-САПР 2011 [Текст] : учебное пособие / Ю. В. Гензерский и др. — К. : Электронное издание, 2011. — 396 с.
7. Методические рекомендации по расчёту устойчивости земляных сооружений и оползневых склонов при статических нагрузках. — К. : НИИСК, 1985. — 40 с.

© Емец Е. В.

© Никишина И. А.

© Коняшкина О. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ПГС и А ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я., к.т.н., доц., и.о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.

Статья поступила в редакцию 03.10.19.

к.т.н. Ємець О. В., Нікішина І. О., Коняшкіна О. А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ГРУНТОВОГО МАСИВУ, РОЗТАШОВАНОГО ПОБЛИЗУ УКОСІВ

Наведено результати дослідження стійкості грунтового масиву, розташованого поблизу укосу, з використанням ПК «ЛІРА», запропоновано заходи щодо підвищення стійкості укосів.

Ключові слова: стійкість, грунтовий масив, зсуви, укоси, моделювання, зсув ґрунтових масивів, поверхні ковзання.

PhD in Engineering Emets E. V., Nikishina I. A., Koniashkina O. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)
INVESTIGATION OF SOIL MASS STABILITY NEARBY SLOPES

There have been given the results of investigation of soil mass stability nearby slope, using the PC “LIRA”, as well there have been proposed measures to improve the stability of slopes.

Key words: *stability, soil mass, landslides, slopes, modeling, soil mass displacement, sliding surfaces.*

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**МАШИНОБУДУВАННЯ
ТА МАШИНОЗНАВСТВО**

**MECHANICAL ENGINEERING
AND MACHINE SCIENCE**

УДК 622.647.2

д.т.н. Корнеев С. В.,
к.т.н. Доброногова В. Ю.,
Долгих В. П.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, vidofea@gmail.com)

ОБОСНОВАНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ УТОЧНЁННОГО ТЯГОВОГО РАСЧЁТА

Приведён анализ скоростных режимов работы шахтных ленточных конвейеров и обоснование эффективности регулирования их скорости по фактору затрат энергии в условиях неравномерных грузопотоков с применением специальной методики уточнённого тягового расчёта.

Ключевые слова: ленточный конвейер, скорость, специальный метод уточнённого тягового расчёта.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. На угольных шахтах при эксплуатации ленточных конвейеров насущной проблемой является снижение энергозатрат, которые достигают 20 % от всей потребляемой на шахтах электроэнергии.

Часть потребляемой приводом конвейера энергии — практически постоянная — расходуется на перемещение тягового органа (ТО), другая, вариативная часть затрачивается на перемещение груза. Изменчивость второй составляющей вызвана неравномерностью поступающих на работающий конвейер грузопотоков и перерывами в их поступлении. При увеличении доли этой составляющей, что достигается в результате максимально возможного заполнения ленты грузом, уменьшаются коэффициент тары конвейера и, соответственно, доля затрат энергии на перемещение ТО. Повышается выраженный в массовых единицах транспортируемого груза ресурс ленты и роlikоопор, а также КПД электродвигателей. Снижение энергозатрат путём увеличения доли второй составляющей в общем балансе потребляемой энергии является одним из направлений решения указанной выше проблемы. Технически это обеспечивается двумя способами: 1) управлением характеристиками грузопотока посредством аккумулирующих

бункеров; 2) автоматическим регулированием скорости конвейера [1–3].

Для конвейерных линий участкового транспорта, в отличие от магистральных конвейеров, применение аккумулирующих бункеров в силу больших капитальных затрат на их сооружение при сравнительно небольшом сроке эксплуатации этих линий, как правило, оказывается экономически нецелесообразным.

Более эффективным представляется частотное регулирование приводных асинхронных двигателей (АД) участковых конвейеров, направленное на поддержание погонной массы груза на конвейере на заданном максимально возможном уровне. Однако широкого распространения управление скоростью конвейера не получило. Причины этому следующие: 1) обоснование эффективности регулирования скорости основывается на показателях потребления электрической энергии, рассчитываемых с применением типовой методики тягового расчёта, в которой не учитывается влияние скорости тягового органа на сопротивление движению ТО, в результате чего, как показано в работе [4], погрешность расчётов может достигать 22 %; 2) остаётся недостаточно исследованным влияние регулирования скорости на долговечность конструктивных элементов конвейера (ленты, роликов и пр.), при кото-

ром, с одной стороны, проходимость ими путь или число циклов нагружения снижаются, а с другой — погонная масса груза и, соответственно, нагрузки возрастают; 3) преобразователи частоты АД, до появления современных, основывающихся на новой элементной базе и имеющих рудничное исполнение преобразователей частоты со звеном постоянного тока (ПЧВ-К У5, DYNAVERT VSD-1140V, BARTEC и др.), по своим характеристикам не подходили для работы в подземных условиях угольных шахт.

Также очевидно: 1) использование высокопроизводительных конвейеров для обслуживания малых грузопотоков со снижением при этом скорости просто нецелесообразно; 2) увеличению скорости движения ленты сверх номинального значения препятствуют свойства транспортируемого груза, который может сыпаться с конвейера; 3) длительная работа преобразователя частоты в режиме пониженных частот требует принудительного охлаждения как АД, так и самого преобразователя.

Все эти вопросы по-прежнему требуют системного исследования.

Постановка задачи. Задачей исследования является анализ скоростных режимов работы шахтных ленточных конвейеров и обоснование эффективности регулирования их скорости по фактору затрат энергии в условиях поступления случайных грузопотоков с применением специальной методики уточнённого тягового расчёта.

Изложение материала и его результаты. В подавляющем большинстве участков конвейерных линий, состоящих из нескольких конвейеров (в частном случае — один конвейер), погрузка каждого из них осуществляется в его хвостовой части, а какие-либо дополнительные пункты погрузки по длине конвейерного става не предусматриваются.

Система автоматического управления (САУ) приводом при установившемся движении тягового органа может выполнять следующие функции: 1) при прекра-

щении поступления груза останавливать конвейер или поддерживать его скорость на некотором минимально допустимом уровне; 2) при случайных грузопотоках регулировать скорость в функции среднего значения погонной массы груза на участке загрузки, расположенном над датчиком веса, для поддержания заданного значения ρ_z погонной массы груза на конвейере на уровне $\rho_{доп}$, соответствующем приёмной способности конвейера, или при загрузке всего конвейера на уровне, обеспечивающем номинальную нагрузку привода.

В качестве сенсоров САУ АД конвейера обычно служат расположенные в пункте погрузки конвейерные весы и, в случае необходимости, датчик скорости ленты.

При поступлении на конвейер нескольких грузопотоков, загружаемых в разных пунктах по длине конвейера, обеспечить путём регулирования скорости равномерное, хотя бы на отдельных участках, заполнение става затруднительно. Поэтому в ряде работ, например в [3], с целью энергосбережения предлагается регулировать скорость, как вариант, для поддержания на заданном уровне статического усилия на валу двигателя. Однако в этом случае, по нашему мнению, при неравномерных грузопотоках и отсутствии контроля заполнения ленты возможно её локальное переполнение и пересыпание груза через борта. Более того, в случае перерывов в поступлении грузопотоков на работающий конвейер и снижения нагрузок до значений, соответствующих режиму холостого хода, искусственное поддержание нагрузки привода на номинальном уровне вообще не имеет смысла.

Поэтому далее рассматриваются только конвейерные линии с загрузкой конвейеров в хвостовой части и регулированием скорости для обеспечения максимально возможной загрузки конвейера.

Возможны следующие четыре основных скоростных режима работы конвейерной линии:

1. *Конвейерная линия работает практически непрерывно, за исключением ос-*

тановок, связанных с отказами самой линии, скорость конвейеров не регулируется. В настоящее время это наиболее распространённый вариант работы шахтных конвейеров, который в данной работе принимается в качестве базового.

Если при остановке любого конвейера в цепочке последовательно расположенных конвейеров останавливается вся линия, то в этом случае всю конвейерную линию можно рассматривать как единый конвейер. При поступлении на конвейерную линию нескольких грузопотоков происходит их суммирование. Погонная масса груза на конвейере изменяется по его длине и является случайной величиной.

2. *Конвейерная линия работает только при поступлении на неё груза, скорость конвейеров не регулируется.* При таком режиме работы полностью исключаются незагруженные участки на конвейерах, чем он, с энергетической точки зрения, выгоднее предыдущего режима, так как в этом случае в среднем увеличивается погонная масса груза на конвейере и, следовательно, снижаются коэффициент тары, а также, соответственно, доля затрачиваемой электроэнергии, которая приходится на перемещение ТО.

На практике такой режим вряд ли осуществим в полной мере, поскольку остановки конвейерной линии при кратковременных перерывах в поступлении груза могут привести к усложнению управления конвейерами, частым запускам линии с повышенными пусковыми нагрузками и затратами времени.

3. *Конвейерная линия работает только при поступлении на неё груза, скорость конвейеров регулируется.* На машинном времени работы линии паузы в поступлении груза отсутствуют, т. е. конвейеры всегда полностью загружены по длине. Регулируется скорость первого по ходу грузопотока конвейера для поддержания погонной массы груза ρ на заданном уровне, а скорость остальных конвейеров, во избежание бункеризации груза, должна быть

равна скорости первого конвейера. С точки зрения потребления энергии это самый экономически выгодный режим, однако, как и предыдущий 2-й режим, на практике он, по тем же причинам, вряд ли может быть реализован в полной мере.

4. *Конвейерная линия работает непрерывно, за исключением остановок, обусловленных отказами самой линии; при поступлении груза на тот или иной конвейер его скорость регулируется, в результате чего погонная масса груза поддерживается на некотором заданном уровне. Если же груз не поступает, то скорость поддерживается на некотором заданном минимальном уровне v_{\min} .* Обычно для конвейеров с самообдуваемыми АД по условию допустимого нагрева двигателей v_{\min} принимается равной $(0,1 \dots 0,25)v_n$, где v_n — номинальное значение скорости конвейера [5].

Чем меньше v_{\min} , тем больше этот режим приближается к 3-му режиму. При таком управлении уже на первом в линии конвейере происходит, по сравнению с базовым режимом, уменьшение длины, «сокращение» незагруженных участков ленты, образующихся при отсутствии поступления на конвейер груза. Более того, при индивидуальном управлении скоростью конвейеров на каждом последующем в линии конвейере этот эффект может усиливаться, так как при его работе на скорости v_{\min} (груз не поступает) скорость предыдущего конвейера, работающего в режиме загрузки, может оказаться больше, чем v_{\min} . Дополнительное за счёт этого эффекта снижение расхода электроэнергии составляет 4...5 % [2].

В принципе, возможны варианты управления, например, каждым конвейером в системе отдельно. Возможна работа конвейера при поступлении на него груза до его полного заполнения (используется аккумулярующая способность конвейера) при неработающем последующем элементе системы. Существующая система автоматического управления конвейерной линией (САУКЛ) позволяет отключать отдельные конвейеры, работающие в режиме холостого хода.

Для выяснения преимуществ 4-го режима работы в сопоставлении с базовым режимом произведено моделирование процесса загрузки наиболее распространённого на угольных шахтах участкового конвейера 1Л800Д, оснащённого лентой ЕР-800/4-5+2 и роlikоопорами ГЖ80-108-30, в обоих режимах в соответствии с алгоритмом [6], основывающимся на специальной уточнённой методике тягового расчёта [7]. Длина конвейера — 600 м, угол установки — 0°. Погонная масса ленты — 13,8 кг/м; допустимая погонная масса груза $\rho_{\text{доп}}$ — 60 кг/м; масса вращающихся частей роlikоопоры — 14,7 кг; расстояние между роlikоопорами верхней ветви — 1,2 м; номинальная скорость конвейера v_n — 2 м/с.

Непрерывный минутный углепоток, поступающий на конвейер, является нормальным случайным процессом. Математическое ожидание углепотока m_q варьируется в пределах от 0 до 3,5 т/мин; коэффициент вариации принимается равным 0,57; корреляционная функция представляется в виде экспоненты; время корреляции τ_k — 4 мин.

Длительности импульсов и пауз в поступлении груза, наблюдаемых в течение машинного времени конвейера, являются случайными величинами, подчиняющимися экспоненциальному закону распределения.

Коэффициент поступления груза на конвейер (для базового варианта он является также коэффициентом заполнения конвейера):

$$k_{\text{п. г}} = \frac{\bar{t}_{\text{и}}}{\bar{t}_{\text{и}} + \bar{t}_{\text{п}}} = \frac{\lambda v}{\lambda(\lambda + v)}, \quad (1)$$

где $\bar{t}_{\text{и}}$ и $\bar{t}_{\text{п}}$ — математические ожидания длительностей импульсов и пауз в поступлении груза, λ и v — параметры законов распределения, $\lambda = 1 / \bar{t}_{\text{и}}$, $v = 1 / \bar{t}_{\text{п}}$.

Коэффициент поступления груза в результате выбора значений $\bar{t}_{\text{и}}$ и $\bar{t}_{\text{п}}$ варьируется в пределах от 0 до 1.

Интервал времени управления АД t_y также, как и мерный интервал грузопотока, принимается равным одной минуте.

Грузопоток, поступающий на конвейер в течение его машинного времени, представляется в виде временного ряда q_k ($k = 1, \dots, k_{\text{max}}$). Заметим, что $q_k = 0$, если груз на конвейер не поступает. Число реализаций k_{max} минутного грузопотока q_k принимается равным 10^4 .

Рассматривается идеальное регулирование скорости, при котором в случае поступления груза в течение соответствующего k -го интервала времени обеспечивается равенство k -й погонной массы груза ρ_k заданному значению ρ_3 . При этом реализация скорости $v_k = q_k / \rho_3 t_y$.

В случае базового варианта (скорость постоянна) величина погонной массы груза ρ_k на каждом k -ом участке загрузки конвейера длиной $l_k = t_y v_n$ также предполагается неизменной, но для каждого k разной, так как $\rho_k = q_k / \rho_3 v_n$.

В реальных условиях в обоих случаях погонная масса груза в течение минуты может изменяться случайным образом, что, естественно, отражается на точности моделирования. Точность моделирования будет выше, если, сокращая шаг управления скоростью, оперировать внутриминутными углепотоками. Однако для них не накоплены достаточные для моделирования статистические данные.

Зависимости средних значений мощности \bar{N}_p и $\bar{N}_{\text{нр}}$ от m_q и $k_{\text{п. г}}$, полученные для базового и 4-го скоростных режимов конвейера с применением специальной уточнённой методики тягового расчёта, отражены на рисунке 1, а.

При расчёте по специальной уточнённой методике сопротивления движению ленты с грузом при прохождении i -ой роlikоопоры $W_{ik}(v_k, \rho_{ik}, S_{ik})$ определяются по формулам [7]:

— при регулировании скорости в случае поступления груза ($\rho_k = \rho_3$):

$$W_{ik}(S_{ik}, v_k) = 7,62 - 1,23S_{ik} + 28,87v_k - 0,0062S_{ik}v_k + 0,023S_{ik}^2 + 3,75v_k^2; \quad (2)$$

– при постоянной скорости v_n :

$$W_{ik}(S_{ik}, p_{ik}) = 39,78 - 1,85S_{ik} + 0,53p_{ik} - 0,0036S_{ik}p_{ik} + 0,028S_{ik}^2 - 0,0046p_{ik}^2. \quad (3)$$

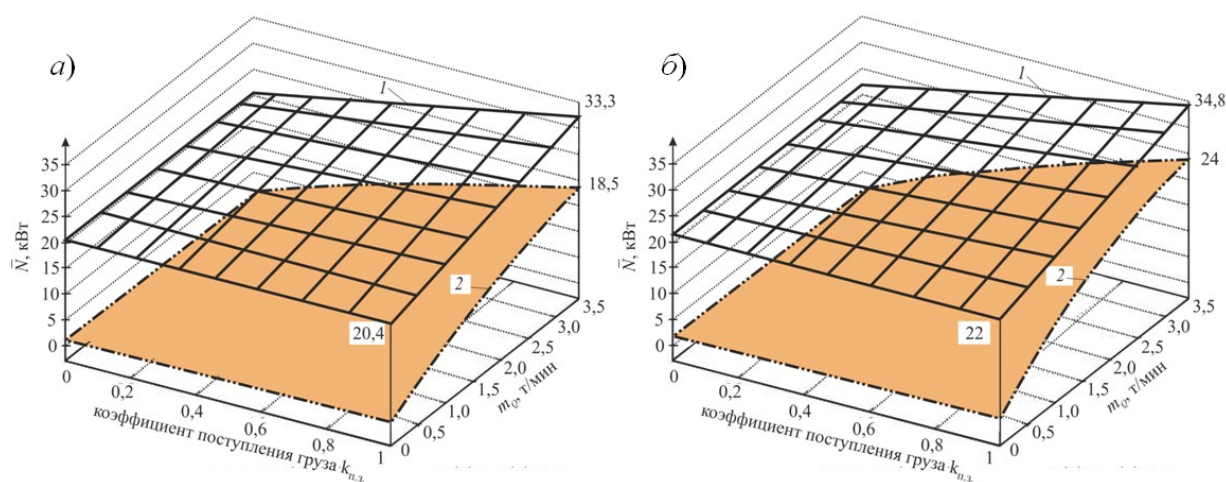
Для каждого варианта регулирования скорости среднее значение мощности, являющейся произведением случайных величин — скорости v и тягового усилия на приводном барабане W , — может быть также определено по формуле

$$\bar{N} = \bar{v}\bar{W} + \bar{K}(v, W), \quad (4)$$

где \bar{v} и \bar{W} — средние значения скорости и тягового усилия конвейера; $\bar{K}(v, W)$ —

оценка корреляционного момента случайных величин v и W .

Для достаточно длинных конвейеров ($L_k \gg v_k t_y$ и $L_k \gg v_k \tau_k$) при существенном ослаблении статистической связи между случайными величинами v и W вторым слагаемым в выражении (4) в ряде случаев можно пренебречь. Например, для типичного случая при $m_q = 3,42$ т/мин и $k_{п.г} = 0,5$ (длина конвейера 600 м, $t_y = 1$ мин) в результате моделирования получено: $\bar{v} = 0,97$ м/с; $\bar{W} = 25,1$ кН; $\bar{N} = 26,5$ кВт. При расчёте по формуле (4) $\bar{N} = 25,7$ кВт. Относительная погрешность составляет 3 %.



а) расчёт по специальной уточнённой методике тягового расчёта;
б) расчёт по типовой методике тягового расчёта;
1 — базовый режим (скорость не регулируется);
2 — 4-й режим (скорость регулируется)

Рисунок 1 Зависимости мощности, потребляемой конвейером 1Л800Д, от математического ожидания минутного углепотока и коэффициента поступления груза на конвейер

В каждом конкретном случае эффективность регулирования скорости можно оценить посредством разности $\Delta\bar{N} = \bar{N}_{нр} - \bar{N}_p$ или коэффициента эффективности $k_p = \Delta\bar{N} / \bar{N}_{нр}$. Из анализа рисунка 1, а видно, что наименьшие значения величин $\Delta\bar{N}$ и k_p , равные, соответственно, 14,8 кВт и 0,44, отвечают наибольшему заполнению ленты, т. е. в данном случае сочетанию ис-

ходных данных: $m_q = 3,5$ т/мин и $k_{п.г} = 1$. В режимах, близких к режиму холостого хода конвейера, т. е. при $m_q \rightarrow 0$ или $k_{п.г} \rightarrow 0$, величины $\Delta\bar{N}$ и k_p принимают наибольшие значения, в данном случае, соответственно, 19,58 кВт и 0,96, в общем же случае $k_p \rightarrow 1 - v_{\min} / v_n$. Подтверждается известный факт — регулирование скорости наиболее эффективно при малых грузопотоках.

Ожидаемая годовая экономия электроэнергии определяется по формуле

$$C_э = T_m c_p \Delta \bar{N}, \quad (5)$$

где T_m — продолжительность машинного времени работы конвейера в течение года, час; c_p — стоимостная оценка активной электроэнергии, по действующим ценам и тарифам для потребителей 1-го класса напряжения $c_p = 3,673$ рос. руб. за 1 кВт·час (Постановление Совета Министров ЛНР от 25 октября 2016 г. № 600).

Для конвейера 1Л800Д для заданных значений m_q и $k_{п.г}$ величина $\Delta \bar{N}$ находится в пределах от 15,3 до 19,55 кВт, коэффициент эффективности регулирования скорости — от 0,45 до 0,96; при годовой продолжительности работы конвейера T_m , равной 3150 ч, величина $C_э$ находится в диапазоне значений от 177 до 226 тыс. рос. руб. При стоимости $C_{п.г}$ одного преобразователя частоты, равной 400 тыс. рос. руб., ожидаемый срок окупаемости будет равен $C_{п.г}/T = 400/177(226) = 2,2(1,7)$ года.

Аналогичные результаты, полученные с применением типовой методики тягового расчёта, отражены на рисунке 1,б. Величины $\Delta \bar{N}$, k_p и $C_э$, полученные для всего спектра характеристик шахтных грузопотоков, находятся в диапазоне значений, соответственно, 10,8 кВт, 0,31 и 125 тыс. рос. руб.

Очевидно, что наибольший эффект от регулирования скорости обеспечивается при существенной неравномерности грузопотоков, а точность расчётов показателей эффективности (до 30 %) — при проведении расчётов с применением специальной уточнённой методики, что позво-

ляет при заданных условиях эксплуатации более обоснованно выбирать скоростной режим конвейера.

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Наиболее рациональным является режим работы конвейера (конвейерной линии), при котором он работает непрерывно, за исключением остановок, обусловленных отказами самого конвейера. При поступлении груза на конвейер его скорость регулируется в функции поступающего грузопотока. Если же груз не поступает, то скорость поддерживается на некотором заданном минимальном уровне v_{\min} .

2. Величины коэффициента эффективности регулирования скорости k_p и, соответственно, годовой экономии электроэнергии $C_э$, полученные для конвейера 1Л800Д при расчёте с применением специальной уточнённой методики тягового расчёта для всего спектра характеристик шахтных грузопотоков, находятся в диапазоне значений, соответственно, от 0,45 до 0,96 и от 177 до 226 тыс. рос. руб.

3. Наибольшее значение коэффициента эффективности регулирования скорости конвейера k_p , достигаемое в области малых грузопотоков, т. е. при $m_q \rightarrow 0$ или $k_{п.г} \rightarrow 0$, равно $1 - v_{\min} / v_n$.

4. Точность определения коэффициента эффективности регулирования скорости конвейера в результате применения специальной уточнённой методики тягового расчёта повышается, в зависимости от характеристик грузопотока, до 30 %, что позволяет более обоснованно выбирать скоростной режим.

Библиографический список

1. Шахмейстер, Л. Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости конвейеров [Текст] / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев, А. К. Лобачева. — М. : 1972. — 106 с.
2. Заика, В. Т. Влияние регулируемого привода на грузопотоки и энергоэффективность системы шахтного конвейерного транспорта [Текст] / В. Т. Заика, Ю. Т. Разумный, В. Н. Прокуда // Науковий вісник Національного гірничого університету. — 2015. — № 3. — С. 82–88.
3. Ставицкий, В. Н. Динамика нагрузки регулируемого привода ленточного конвейера [Текст] / В. Н. Ставицкий // Наукові праці ДонНТУ. — 2012. — № 201. — С. 49–53.

4. Корнеев, С. В. Моделирование реальных нагрузок в шахтных ленточных конвейерах на основе уточнённого тягового расчёта [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих, В. Ю. Доброногова // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2019. — № 56. — С. 81–90.

5. Стадник, Н. И. Частотно-регулируемый электропривод ленточных конвейеров на базе самовентилируемых двигателей [Текст] / Н. И. Стадник // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. гірн.-електромех. — 2012. — Вип. 2. — С. 226–232.

6. Корнеев, С. В. Опыт моделирования забойных углепотоков [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих, В. Ю. Доброногова // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2018. — № 52. — С. 21–28.

7. Корнеев, С. В. Методика тягового расчёта шахтных ленточных конвейеров на основе компьютерного моделирования сопротивлений движению тягового органа [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Известия вузов. Горный журнал. — 2016. — № 3. — С. 81–89.

© Корнеев С. В.

© Доброногова В. Ю.

© Долгих В. П.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
к.т.н., доц., и.о. зав. каф. ГЭиТС ЛНУ им. В. Даля Петровым А. Г.*

Статья поступила в редакцию 03.10.19.

**д.т.н. Корнеев С. В., к.т.н. Доброногова В. Ю., Долгих В. П. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)
ОБҐРУНТУВАННЯ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ШАХТНИХ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СПЕЦІАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ УТОЧНЕНОГО ТЯГОВОГО
РОЗРАХУНКУ**

Наведено аналіз швидкісних режимів роботи шахтних стрічкових конвеєрів та обґрунтування ефективності регулювання їх швидкості за фактором витрат енергії в умовах нерівномірних вантажопотоків із застосуванням спеціальної методики уточненого тягового розрахунку.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, швидкість, спеціальний метод уточненого тягового розрахунку.

**Doctor of Technical Science Korneev S. V., PhD in Engineering Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P.
(DonSTU, Alchevsk, LPR)**

**JUSTIFICATION OF THE RATE MODE OF MINE BELT CONVEYORS USING A SPECIAL
TECHNIQUE OF REFINED TRACTION CALCULATION**

There has been given the analysis of high-rate operating modes of mine belt conveyors and substantiation the efficiency of regulating their rate by the factor of energy costs within the conditions of non-uniform freight flows using special techniques of refined traction calculation.

Key words: belt conveyor, rate, special method of refined traction calculation.

УДК 621.967.3

*к.т.н. Ульяницкий В. Н.,
к.т.н. Петров П. А.,
к.э.н. Ульяницкая О. В.,
Билан Г. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НОЖНИЦ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Выполнен анализ исследований и практических методов повышения эксплуатационной стойкости и долговечности режущего инструмента ножниц прокатного производства и экономической эффективности процесса резания металлопроката.

Ключевые слова: износостойкость, форма ножа, ножевой материал, эксплуатационная надёжность, наплавка, криогенная обработка.

На современном этапе развития металлургической отрасли главной задачей в чёрной металлургии является снижение себестоимости товарного проката при значительном повышении качественных показателей металлопродукции.

Технологический процесс производства металлопроката включает операцию его порезки с целью получения заготовок (блюд, слябов) определённой длины, листовых раскатов для получения стандартных или заказных размеров товарного листа, сортовых профилей проката необходимых длин.

Удовлетворение повышенных требований потребителей (заказчиков) к свойствам прокатной продукции невозможно без выполнения операций качественной порезки, которая во многом зависит от ритмичной и надёжной работы участков резки, оборудованных комплексом режущих устройств или отдельными (обжимные цехи, сортовые МНЛЗ) машинами.

Механическую резку проката выполняют ножницы многих конструктивных моделей, обусловленных функциональным назначением, характеристиками разрезаемого металла и условиями процесса резки.

Межремонтный срок службы ножниц на большинстве металлургических предприятий сравнительно небольшой и определяется в основном износостойкостью

режущего инструмента — плоских и дисковых ножей [1]. Количество переточек ножа до полного (допустимого) износа на большинстве предприятий составляет: для гильотинных ножниц — 4...6, для дисковых — 10...12.

Эксплуатационная надёжность ножей обуславливается условиями, в которых работают ножницы — это порезка горячего металла (обжимные, заготовочные и крупносортные цехи, сортовые МНЛЗ) и порезка листового проката.

Наряду с недостаточной износостойкостью ножей, выражающейся в затуплении режущих кромок, проявляются и такие часто встречающиеся дефекты, как трещины и выкрошивание участков рабочей поверхности ножа. Замена дефектного режущего инструмента требует остановки оборудования участка резки, что отрицательно сказывается на производственной программе цеха.

Поэтому выбор материала и технологии изготовления режущего инструмента для ножниц прокатных цехов и сортовых МНЛЗ имеет первостепенное значение с точки зрения его износных свойств и прочностных характеристик [2].

Конструктивно ножи изготавливают следующих форм и модификаций. Согласно функциональному назначению режущей машины — плоские параллельные у

ножниц обжимных и заготовочных станов, плоские наклонные для резки листов на ножницах гильотинного типа и ножницах с дуговым верхним ножом («катящийся» рез). Для порезки простого сортового и фасонного проката, а также непрерывно-литых заготовок МНЛЗ применяют про-

филированные одно- или многоручьевые ножи. В случае продольной резки листового металлопроката наибольшее распространение получили дисковые одно-, двух- и многопарные ножницы. Схемы поперечного и продольного резания проката представлены на рисунке 1.

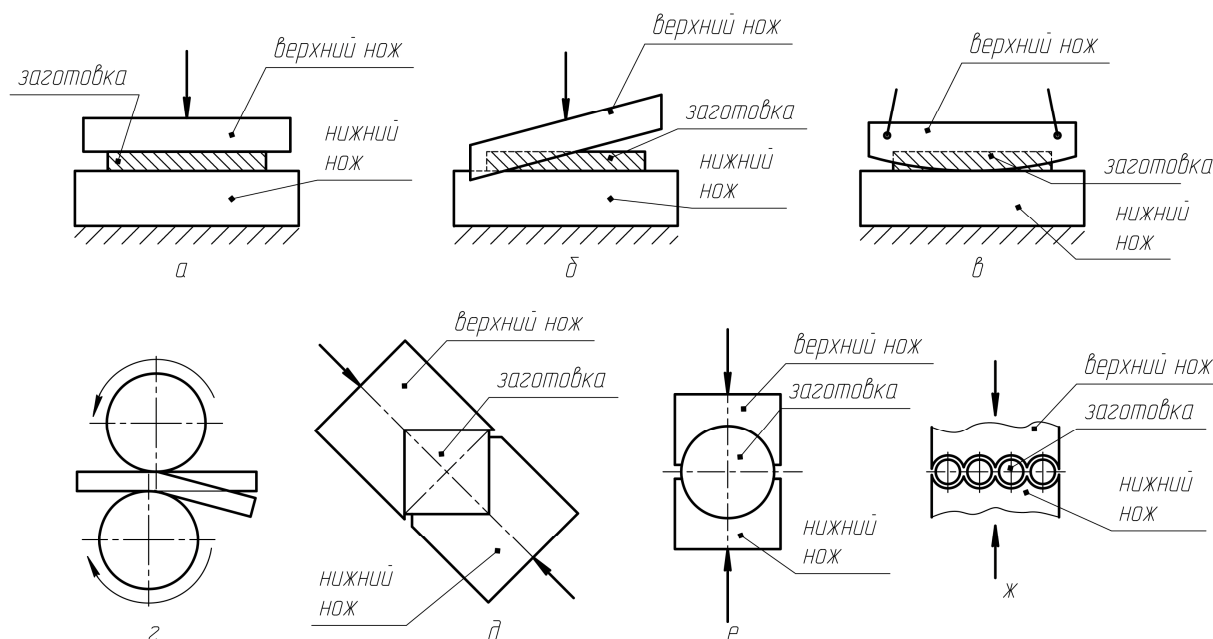


Рисунок 1 Схемы порезки проката ножами различных конструктивных форм:

- a* — плоские параллельные (прямые ножи); *б* — плоские наклонные (гильотинный рез); *в* — с дуговым верхним ножом («катящийся» рез); *г* — продольная резка дисковыми ножами; *д* — сортовые ножи (*д* — резка квадрата, *е* — резка круглой стали); *ж* — пакетная резка

В основном ножи для режущих машин прокатных цехов и МНЛЗ изготавливают цельными. Характеристики разрезаемого металла и условия выполнения операции резки (большие усилия резки, тепловые нагрузки на инструмент) ограничивают использование составных ножей. Особенно они недостаточно эффективны при обработке высокопрочных ($\sigma_B > 1000$ МПа) сталей и сплавов в холодном состоянии из-за случаев разрушения конструкции.

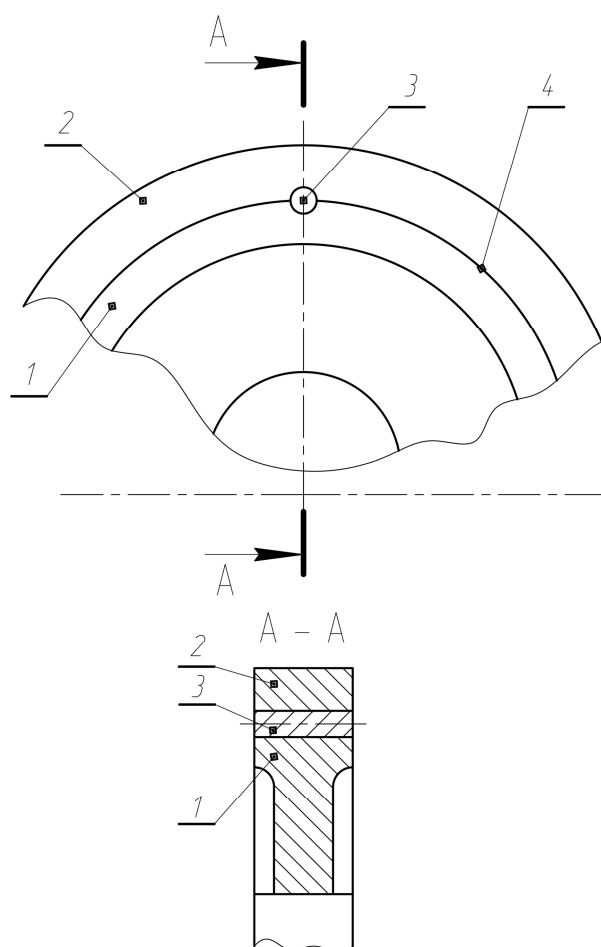
Принципиальные схемы изготовления составных и бандажированных ножей представлены на рисунках 2 и 3.

Однако авторы работы [3] отмечают экономическую невыгодность изготовления ножей цельными из-за большого рас-

хода дорогостоящих марок ножевого металла. Утверждается, что в процессе эксплуатации используется только 7–10 % массы цельного ножа из-за переточек, а остальное отправляется на переплав.

Подтверждением этому служат ножи двухпарных дисковых ножниц для порезки холодных и частично горячих листовых раскатов в толстолистовом цехе Алчевского металлургического комбината (АМК). Основные сведения об эксплуатационных характеристиках ножей дисковых ножниц приведены в таблице 1.

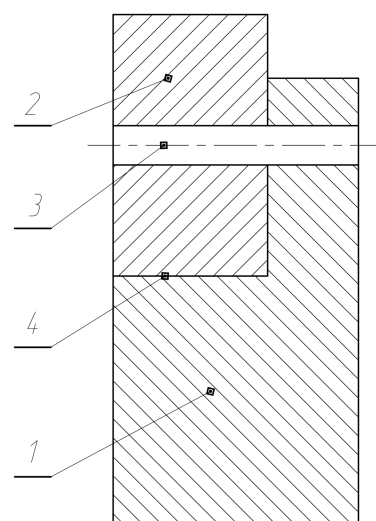
Ножи с затупленной режущей кромкой подлежат переточке, а если восстановление рабочей поверхности невозможно, ножи перешлифовывают на следующий ремонтный размер.



1 — обод; 2 — бандаж из высокопрочного износостойкого материала; 3 — цилиндрический стержень (шпонка); 4 — поверхность сопряжения

Рисунок 2 Один из вариантов бандажирования дискового ножа

Единственным изготовителем и поставщиком дисковых ножей для ножниц толстолистного стана 3000 (до 2006 г. — стан 2800) АМК был и остается ЗАО «ГМЗ-Гедумекс», г. Нижний Новгород (в СССР — Горьковский металлургический завод). За годы эксплуатации (с 1958 г.) дисковых ножниц поставщик использовал для ножей стали марок 55ХНВ, 5ХВН, 5ХВС.



1 — корпус; 2 — высокопрочный износостойкий материал; 3 — элемент крепления; 4 — поверхность сопряжения

Рисунок 3 Фрагмент конструкции составного ножа для резки металла

Таблица 1

Некоторые данные о дисковых ножах АМК

Дисковый нож			Среднее число переточек	Потери на переточках		Цена нового ножа	Стоимость одной переточки, руб.	Цена ножа на 1 т порезанного металла, руб./т
Диаметр, мм	Материал	Масса, кг		Абсолютный показатель, кг	Относительный показатель, %			
$\frac{1000^*}{920}$	6ХВ2С 5ХВ2С	$\frac{405}{330}$	16	$\frac{75}{4,6...4,7}$	$\frac{16-17^{**}}{1,0...1,06}$	$\frac{36500^{***}}{570,3}$	208,2	0,024

* числитель — показатель нового, знаменатель — перешлифованного ножа;

** числитель — показатель всех переточек, знаменатель — одной переточки;

*** цена по курсу 2019 года: числитель — в рублях, знаменатель — в долларах США.

Рабочие поверхности режущей части ножей имеют твёрдость HRC 52–56. До распада СССР комбинат ежегодно закупал 135 дисковых ножей по цене 757,35 руб. за штуку. В 2011 г. цена одного ножа составила 18574 руб. (\$ 570,3). После известных событий 2014 г. в Донбассе производственный процесс комбината лишился стабильности, возникли проблемы с поставками сырья и реализацией продукции. С того времени новые ножи не приобретались.

Для изготовления режущего инструмента, используемого в прокатном производстве и цехах машиностроительных предприятий, наиболее применяемыми являются стали марок 5ХВА, 5ХНВ, 5ХВС, 55ХНВ, 5ХВ2С, 6ХВ2С, 55ХНМ, Х10С2М, 6ХНМ, 45ХН2Ф, 25ХНФА, 5Х2МНФ [3]. Наблюдаемое разнообразие материалов ножей, видимо, обусловлено отсутствием полной централизации их изготовления и различными требованиями потребителей к свойствам ножевого материала.

С течением времени ряд специальных сталей для ножей расширился. Совместными исследованиями специалистов АМК и учёными ДонГТУ была доказана целесообразность использования для ножей спецсплава СП-28 (кодировка до введения на него госстандарта). Теперь он известен как сталь марки 28Х3СНМВФА. Ножи, изготовленные из СП-28 и упрочнённые по рабочим граням электроискровым легированием сплавом Т5К10, в разы меньше изнашиваются, нежели инструмент из сталей 6ХВ2С и 45ХН2Ф [4].

Изготовление цельных ножей из высококачественных сталей с последующими разноступенчатыми технологиями термоупрочнения позволяет несколько повысить износостойкость инструмента, улучшая его эксплуатационные показатели. Однако высокая себестоимость и минимальный расход (7–17 %) массы до списания на переплав вынудили специалистов к ещё одному направлению изготовления ножей из относительно дешёвых сталей с наплавкой их рабочих поверхностей композитными материалами.

Износостойкая наплавка ножей не только существенно увеличивает ресурс их работы, но и даёт возможность избежать или значительно снизить повреждение товарной продукции (неровность поверхности реза, появление заусенцев, зарождение трещин).

В отечественной металлургии наплавка ножей имеет достаточно длительную практику, обусловленную поиском необходимых наплавочных материалов и разработкой эффективных технологий нанесения их на режущие элементы ножей [5].

Требования, предъявляемые к ножам горячей резки, сводятся к следующему: материал ножа должен характеризоваться высокими режущими свойствами, т. е. сохранять высокие прочность и твёрдость при значительных температурах (800–1200 °С), а также высокую термическую выносливость. Эти свойства в определённой степени присущи сталям 6ХВ2С, 5ХВ2С, 37ХН3А, 5ХНТ и др. после закалки и соответствующего отпуска. Однако использование для ножей дорогостоящих и труднообрабатываемых сталей, содержащих значительный процент вольфрама, никеля и других легирующих элементов, нецелесообразно, так как рабочие участки ножа составляют не более 5–7 % от массы всей детали. Срок службы ножей относительно мал — 7...8 суток.

Все попытки повысить стойкость ножей изменением режима термообработки не дали значимого положительного результата.

Наиболее эффективным методом повышения стойкости ножей является наплавка режущих кромок металлом, соответствующим поставленным требованиям, что позволяет заменить названные выше марки обычной углеродистой сталью, например, ковальной марки 45. Так, стойкость одной наплавленной кромки ножа для порезки блюмов составила 10–27 смен, а стойкость ножа — от 15 до 40 суток [5]. Технология изготовления ножей упростилась, а их работоспособность повысилась.

Продолжаются работы по созданию новых наплавочных материалов, технологии

наплавки и оборудования для реализации процесса. Базой для таких исследований являются анализ условий работы ножей и кинетика износа их рабочих кромок [3, 6, 7].

В качестве примера на рисунке 4 приведена конструктивная схема наплавленного ножа для ножниц обжимного стана АМК.

При многовариантных разработках новых электродных материалов для наплавки ножевого инструмента использовали композиты, представленные в таблице 2, составленной по данным [3, 6, 7].

Применение наплавочного материала в виде порошковой ленты ПЛ-АН183 повышает в 1,5...2,0 раза стойкость ножевого материала по сравнению с ножами, наплавленными порошковой проволокой ПП-Нп-35В9Х3СФ.

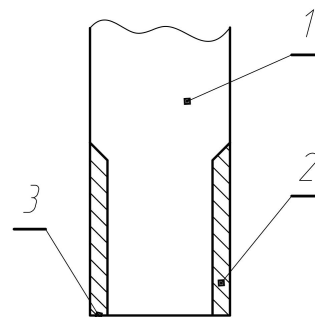
На основании полученных эксплуатационных и экономических данных предпочтение отдано наплавочному материалу 40Х2Н6Г2С2М2ФБ. Твёрдость наплавленного слоя кромки составила HRC 47...54 [3]. Использование для наплавки режущих кромок износостойким сплавом 110Х5М8В2С2ТЮ обеспечило срок эксплуатации ножей в 1,7...2,1 раза больший, чем у цельного ножа из хромовольфрамовой стали марки 5ХВ2С [8].

Поиск износостойкого ножевого материала для порезки высокопрочного

го ($\sigma_b > 1000$ МПа) толстолистового проката в холодном состоянии обусловил исследование сталей 45ХН2Ф и 28Х3СНМВФА. Работы были выполнены совместно с АМК и ДонГТУ. Исследования проводились на ножах промышленных гильотинных ножниц толстолистового стана [4].

Ножи из названных сталей подвергали термической обработке, после которой их твёрдость имела HRC 50...52. Степень затупления режущих кромок определяли на конкретных показателях количества порезанного металла (1,0, 3,8, 5,3, 6,9 и 7,9 тысяч тонн).

Износ однотипных режущих кромок ножей представлен на рисунке 5.



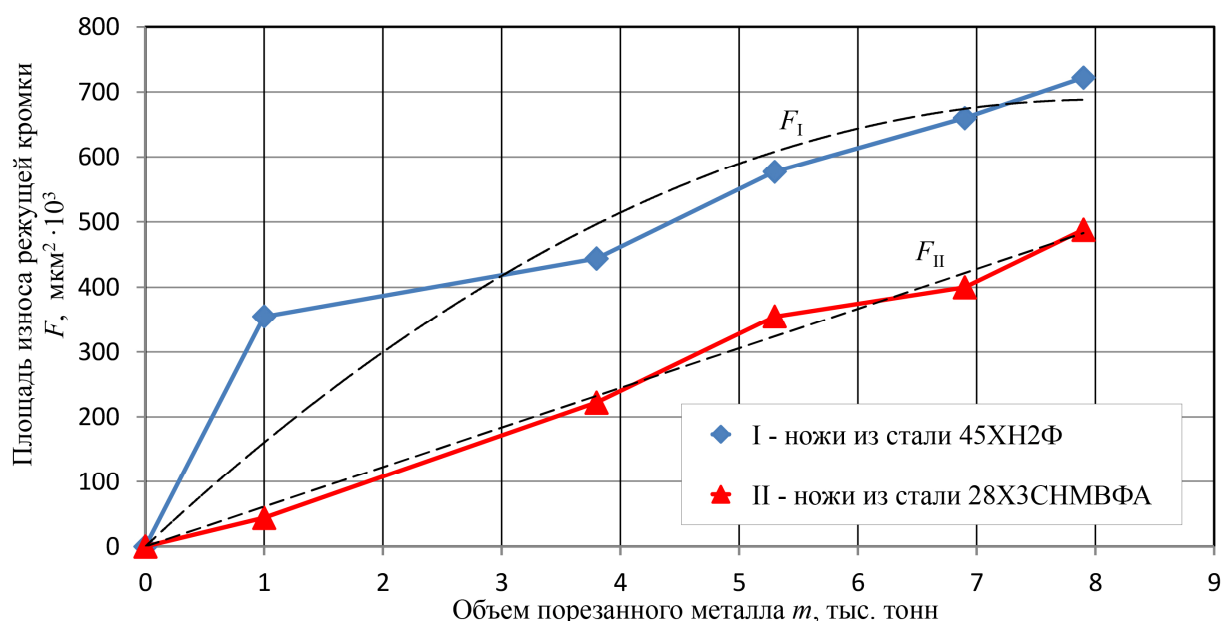
1 — корпус ножа; 2 — наплавленный материал;
3 — режущая кромка

Рисунок 4 Конструктивная схема наплавленного рабочего участка плоского ножа обжимного стана АМК

Таблица 2

Наплавочные материалы для ножей прокатных цехов

№ п/п	Наплавочный материал	Вид и способ использования
1	20Х4В2М2, 30Х4В2М2Г2БФСТ, 40Х2Н6Г2С2М2ФБ, 40Х2Н6К6М2Г2СФ	В виде самозащитной порошковой ленты ПЛ-АН183
2	ЛС-25Х5ФМС, ЛС-20Х5ФМС	Наплавка электродуговым и электрошлаковым способом спечёнными электродными лентами
3	ПП-Нп-35В9Х3СФ	Наплавка под слоем флюса порошковой проволокой
4	110Х5М8В2С2ТЮ	Наплавка порошковым электродом



I — нож изготовлен из стали марки 45ХН2Ф, HRC 50...52;
 II — нож изготовлен из стали марки 28Х3СНМВФА, HRC 50...52

Рисунок 5 Экспериментальные данные (I, II) и аппроксимирующие зависимости (F_I , F_{II}) износа режущих кромок ножей гильотинных ножниц толстолистового стана в зависимости от количества тонн m порезанного листового проката

Испытания показали, что износостойкость ножей из стали 45ХН2Ф (график I) ниже, чем ножей из стали 28Х3СНМВФА (график II). В результате обработки экспериментальных данных получены аппроксимирующие зависимости величины износа F режущей кромки ножа от объема m порезанного проката (рис. 5):

$$F_I = -10620 \cdot m^2 + 170999 \cdot m, \quad (1)$$

$$F_{II} = 61116 \cdot m. \quad (2)$$

Исследованием также установлено, что уровень износостойкости ножей из стали марки 45ХН2Ф, упрочнённых электроискровым способом твёрдым сплавом Т5К10, примерно такой же, как и ножей из стали 28Х3СНМВФА без упрочнения. Упрочнение (легирование) электроискровым способом осуществляли на установке «ЭФИ-25» с режимом работы: ток 75–90 А, напряжение 20 вольт.

Практика эксплуатации ножниц прокатных цехов показала, что замена ножей или

их перекалтовка для использования незатупленных кромок обычно выполняется после порезки 12...20 тыс. тонн проката.

Самую высокую износостойкость показали ножи, изготовленные из стали 28Х3СНМВФА и упрочнённые электроискровым способом сплавом Т5К10. В ходе исследований обнаружено, что термостойкость стали 28Х3СНМВФА выше, чем стали 6ХВ2С.

Поэтому ножи для порезки высокопрочных сталей в холодном состоянии следует изготавливать из стали 28Х3СНМВФА, подвергнув их термическому упрочнению по режиму. Затем режущие кромки упрочнить электроискровым способом твёрдым сплавом Т5К10. Конечной операцией изготовления ножей является шлифование граней детали [4, 9].

В своё время ножи из стали 28Х3СНМВФА взялся изготавливать Дебальцевский машиностроительный завод, определённый Минчерметом СССР как поставщик некоторой номенклатуры за-

пасных частей для предприятий металлургической отрасли. Разрыв экономических связей между Украиной и Россией обусловил вынужденную стагнацию предприятия, а затем последовавшую переориентацию характера производства.

Ещё одним из перспективных направлений повышения износостойкости режущего инструмента ножиц прокатных цехов является обработка ножей криогенной жидкостью (азотом).

Использование криогенных температур (до -196°C) в технологических режимах термической обработки (ТО) изделий из инструментальных сталей рассмотрено в работе [10].

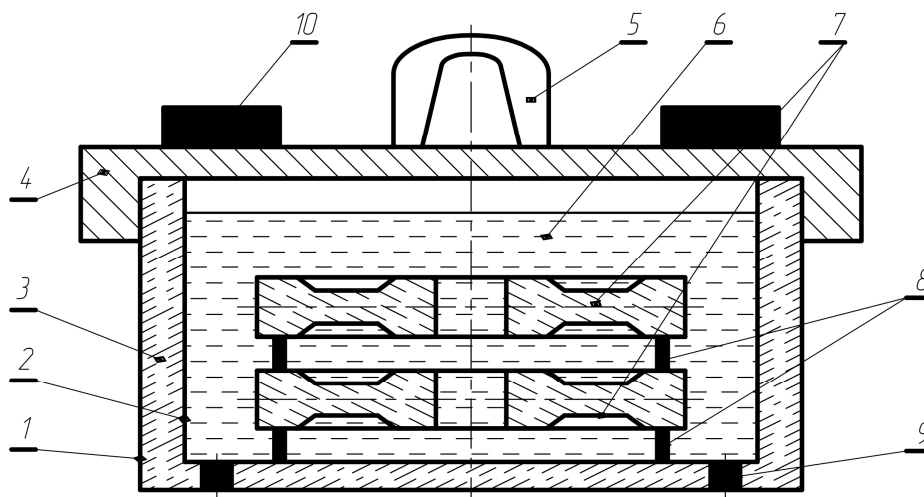
Отмечается особая важность использования криогенной обработки режущего инструмента, изготовленного из традиционных инструментальных марок сталей. При этом отмечается необходимость различать обработку холодом (до $-50...70^{\circ}\text{C}$) и криогенную обработку (до -196°C). Последняя даёт большой эффект структурных мартенситных превращений, обуславливающих износные свойства инструмента. Исследования влияния криогенной обработки на образцах из сталей 150Г7Т, 150Г7Х2, 40Х,

12Х5МА, 25Г2С, 35ГС, Р18, 9ХС, Р6М5 показали положительный результат [10].

Анализ структуры и свойств образцов выявил, что происходит изменение структуры криогенно обработанных сталей и на 25...65 % повышается износостойкость инструмента. Наибольший эффект будет достигаться, если включить криогенную обработку в общую (часто заключительную) операцию термической обработки.

Одновременно авторы работы [10] отмечают, что на машиностроительных предприятиях обработка деталей глубоким холодом сдерживается отсутствием доступных по цене криогенных установок отечественного изготовителя. Стоимость зарубежных (загрузкой от 50...100 кг металла) начинается с 30000 евро и выше. Кроме того, большинство предприятий испытывает ограниченность из-за отсутствия собственного источника криогенной жидкости (азота).

С целью выявления влияния криогенной обработки на промышленный дисковый нож был выполнен эксперимент. Из перешлифованных в одной кассете четырёх ножей отобрали два и поместили в специально изготовленную ёмкость (рис. 6).



1 — корпус из углеродистой стали; 2 — внутренняя стенка из нержавеющей стали; 3 — теплоизоляционный материал; 4 — крышка; 5 — скоба для захвата крюком подъёмного механизма; 6 — криогенная жидкость (азот); 7 — дисковые ножи; 8 — прокладка; 9 — подставка; 10 — прижимной груз

Рисунок 6 Принципиальная схема устройства для криогенной обработки цельных дисковых ножей

В организации данного эксперимента проблематичным стало изготовление специальной ёмкости. Жидкий азот производится в кислородном цехе АМК как побочный продукт получения кислорода.

Камеру с находящимися в ней ножами заполнили жидким азотом, закрыли крышкой и оставили на 48 часов. Извлечённые из камеры дисковые ножи восстанавливались до температуры окружающей среды (цеха) и устанавливались на приводные валы механизмов резания дисковых ножниц попарно: криогенно обработанные с одной стороны, другая пара — с противоположной. Работа ножей в одинаковых условиях показала, что износостойкость рабочей части ножей, подвергнутых низкотемпературной обработке, выше, чем у необработанных жидким азотом.

Однако в процессе регламентированной замены ножей в экспериментальном ноже была обнаружена трещина в углу шпоночного паза ступицы. По этой причине эксплуатационная служба участка резки цеха высказалась против такого способа использования криогенной обработки дисковых ножей. Последовавшие кризисные события в чёрной металлургии не способствовали продолжению обнадеживающих экспериментов повышения стойкости ножей методом криогенной закалки ножевого металла.

Таким образом, получение режущего инструмента для ножниц прокатных цехов имеет следующие приоритетные направления:

– использование новых, более прочных и износостойких материалов;

– совершенствование конструктивных элементов ножей и разработка эффективных режимов термического упрочнения рабочих поверхностей инструмента;

– расширение номенклатуры и создание новых материалов для наплавки ножей практически всех эксплуатирующихся ножниц в прокатных цехах;

– использование влияния низких температур (до -196°C) при термообработке инструментальных и ножевых материалов, получившее название криогенной технологии.

Выводы. Анализ материалов об эксплуатационной надёжности ножниц для порезки проката на ведущих металлургических предприятиях стран СНГ свидетельствует о приоритетности конструкции цельных ножей из ряда легированных марок сталей с использованием схем упрочняющей термической обработки и наплавкой режущих кромок износостойкими материалами.

Наиболее эффективным направлением повышения служебных свойств ножей являются способы упрочнения рабочих поверхностей режущих кромок наплавкой новейшими композитными электродными материалами.

Дальнейшего исследования и оценки требует использование криогенной обработки ножей с целью повышения их износных характеристик при порезке высокопрочных сталей и сплавов.

Библиографический список

1. Петров, П. А. Эффективность способов повышения стойкости и долговечности ножей для порезки проката [Текст] / П. А. Петров, О. В. Ульяницкая, Г. А. Билан // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сб. тезисов докладов III между. науч.-технич. конф. — Алчевск : ДонГТУ, 2018. — С. 33–35.
2. Руфанов, Ю. Г. Влияние термической обработки на механические свойства стали 5ХВ2С и служебные свойства металлургических ножей [Текст] / Ю. Г. Руфанов, И. И. Чалый, С. И. Веселова, О. А. Селифанова // Металлургическое машиноведение и ремонт оборудования : тематический отраслевой сборник Минчермет СССР. — М. : Металлургия, 1978. — № 7. — С. 90–92.
3. Журда, А. П. Материалы и оборудование для наплавки ножей горячей резки металла. Автоматическая сварка [Текст] / А. П. Журда, А. П. Ворончук и др. — К. : ИЭС им. Патона, 2015. — № 5–6. — С. 100–102.

4. Разработка более износостойких материалов и отработка режимов термической обработки ножей дисковых и гильотинных ножниц для резки высокопрочных марок сталей : отчёт о НИР. — Коммунарск, 1973. — № ГР 72039472.

5. Шехтер, С. Я. Восстановление оборудования механизированной наплавкой [Текст] / С. Я. Шехтер. — М. : Металлургия, 1965. — 136 с.

6. Журда, А. П. Износостойкая наплавка порошковыми металлами [Текст] / А. П. Журда, А. П. Ворончук // Сварщик. — 2010. — № 6. — С. 6–9.

7. Журда, А. П. Наплавочные порошковые ленты (обзор) [Текст] / А. П. Журда, А. П. Ворончук // Автоматическая сварка. — 2012. — № 1. — С. 39–44.

8. Пат. РФ № 2293629 В23D 31/04. Нож для измельчения кромки проката / В. В. Карих, В. В. Неверов. — № 2005116364/02 ; заявл. 30.05.2005 ; опубл. 20.02.2007; Бюл. № 5. — С. 5

9. Ульяницкий, В. Н. Некоторые особенности резки высокопрочных сталей [Текст] / В. Н. Ульяницкий и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. — Днепропетровск, 1975. — № 3. — С. 17–21.

10. Повышение износостойкости инструментальных сталей методом криогенной обработки [Текст] / П. В. Крот, С. В. Бобырь и др. // Металлургические процессы и оборудование. — № 4 (34), 2013. — С. 88–97.

© Ульяницкий В. Н.

© Петров П. А.

© Ульяницкая О. В.

© Билан Г. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ им. проф. В. Я. Седуша ДонНТУ Еронько С. П.

Статья поступила в редакцию 30.09.19.

к.т.н. Ульяницкий В. Н., к.т.н. Петров П. О., к.е.н. Ульяницкая О. В., Билан Г. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ НОЖИЦЬ ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА

Виконано аналіз досліджень і практичних методів підвищення експлуатаційної стійкості і довговічності різального інструменту ножниць прокатного виробництва і економічної ефективності процесу різання.

Ключові слова: зносостійкість, форма ножа, ножовий матеріал, експлуатаційна надійність, наплавлення, криогенна обробка.

PhD in Engineering Ul'yanitskiy V. N., PhD in Engineering Petrov P. A., PhD in Economics Ul'yanitskaia O. V., Bilan G. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

ANALYZING THE EFFICIENCY OF METHODS TO ENHANCE THE RESISTANCE AND DURABILITY OF THE ROLLING SHEAR CUTTING TOOL

The analysis of researches and practical methods of increasing the service durability and longevity of the rolling shear cutting tool and economic efficiency of cutting process is fulfilled.

Key words: wear resistance, blade shape, blade material, service reliability, surfacing, cryogenic treatment.

УДК 669.02/.09.004.15:612.8

к.т.н. Вишневский Д. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ВЛИЯНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА НАДЁЖНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО И МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Проведён анализ вероятности отказа человека как одного из элементов технической системы в металлургической и машиностроительной отраслях.

Анализ указывает на необходимость изменения подхода к расчёту показателей надёжности оборудования в металлургической и машиностроительной отраслях, а именно учитывать коэффициент значимости человеческого фактора.

Ключевые слова: надёжность оборудования, технический регламент, человеческий фактор, отказ оборудования, надёжность человеческого фактора.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из важнейших элементов в машиностроительном и металлургическом производстве является надёжность оборудования, которая по ГОСТ 27.002–89 называется «свойством объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, ремонтов, хранения» [1].

Надёжность механического оборудования основывается на положениях классической теории надёжности, исследованиями которой занимались Я. Б. Шор, А. М. Половко, Т. А. Голинкевич; они описали основные понятия и математический аппарат. Терминология в области надёжности и требования по надёжности установлены стандартами ГОСТ 27.002–89, ГОСТ 27.003–90 [2]. Основные положения вероятностно-статистической теории надёжности приведены в монографии Б. В. Гнеденко и др.

В. М. Гребеник, А. В. Гордиенко, В. К. Цапко, В. Я. Седуш предлагают методы формирования и принципы сбора, цифрового кодирования и анализа отказов. Разрабатываются классификаторы машин, узлов, деталей, видов и причин отказов.

Анализ состояния вопроса. Возникновение отказов оборудования происходит по следующим причинам:

- конструктивные дефекты;
- технологические дефекты;
- эксплуатационные дефекты;
- постепенное старение (износ);
- влияние человеческого фактора (в том числе нарушение правил безопасности).

Все эти виды отказов снижают ресурс работы оборудования, что влечёт за собой финансовые затраты на обслуживание, эксплуатацию, выход годной продукции, увеличивая её себестоимость. Если некоторых отказов на данный момент избежать достаточно сложно, то возможно снизить риск их появления за счёт снижения «человеческих отказов», представляющих собой совокупность эмоциональных, психофизиологических, интеллектуальных, физиологических, мотивационных и многих других качеств личности, которые обеспечивают безошибочное, своевременное и адекватное восприятие ситуации при выполнении предписанных функций работы человека с технической системой в процессе выполнения трудовых обязанностей.

Постановка задачи. Необходимо выполнить анализ причин аварий и выхода из строя оборудования в металлургическом и машиностроительном производстве с учётом человеческого фактора.

Материалы и результаты исследования. В связи с несоответствием профессиональной пригодности обслуживающий персонал часто совершает ошибочные

действия, что приводит к авариям или аварийным ситуациям, что влечёт за собой финансовые издержки, касающиеся самого предприятия и государства в целом.

Международная организация труда насчитывает убытки в 200 млрд долларов по причине «человеческого отказа» ежегодно. В связи с вышесказанным качественный состав кадров предприятия должен стоять наряду с технической модернизацией производства.

Анализ причин аварий, выхода из строя оборудования и производственного травматизма на производстве показал, что в подавляющем большинстве нештатные ситуации происходят не из-за технических неисправностей, а из-за неудовлетворительной организации производства работ. Для управления данным процессом необходимо учитывать: причины ошибок персонала; способы влияния на аварийные ситуации [1].

Известно, что труд оперативного персонала металлургических предприятий весьма тяжёлый, имеет связь с угрозой для жизни, также сопровождается как физическим, так и психологическим перенапряжением, переутомлением, стрессами. Всё это связано с условиями труда, рабочим местом, видом деятельности. К причинам проявления профессионального стресса относят: необходимость высокой концентрации внимания для выполнения технического процесса, высокую ответственность за принимаемое решение и действие [3].

Человеческий фактор как источник повышенной опасности

В 1930 г. советский ученый Н. М. Добротворский впервые попытался раскрыть понятие «человеческий фактор», термин которого был сформулирован позже «human factors engineering» (буквально — техника человеческих факторов), используемого в США для проектирования систем «человек – машина».

В 1957 году в США образовалось Общество человеческих факторов, а через год вышел журнал «Человеческие факторы».

В ряде европейских стран и в Российской Федерации был принят термин «эргономика», включающий в себя сферу профессиональной деятельности, которую в США называют «человеческие факторы».

В современном мире термин «человеческий фактор» используется в разных научных сферах: при исследовании рисков в экономике, при конструировании машин и оборудования, при проектировании рабочих мест и т. д.

При проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании машин и агрегатов одним из важных элементов для повышения производительности и качества выпускаемой продукции служит человеческий фактор.

В своей работе «Безопасность машин и человеческий фактор» [4] Б. С. Доброборский даёт определение: «под термином „человеческий фактор“ понимаются осознанные или случайные ошибочные решения или действия человека, вызванные особенностями его биологической природы и условиями его взаимодействия с внешней средой».

Вероятность отказа человека как одного из элементов технической системы достаточно высока, и это связано с тем, что организм человека, который принимает участие в решении поставленных задач в разнообразных областях профессиональной деятельности, обладает рядом специфических свойств, как полезных, так и вредных [5].

Генотипическая и фенотипическая адаптация, концентрация, обучаемость, изобретательность и т. д. — это полезные свойства.

Совершение случайных ошибок, быстрое наступление усталости, случайная потеря информации, заведомо неправильное принятие решения и т. д. — это относится к вредным свойствам.

Из-за перечисленных вредных свойств организма человека и происходят аварии на производстве, техногенные катастрофы, несчастные случаи, хотя на предприятиях имеются нормативные документы, инструкции и т. д.

В качестве примера, по данным информационного агентства «REGNUM», на 10.02.2009 года на шахтах Донбасса за неделю инспекторы Территориального управления Госгорпромнадзора выявили 7447 нарушений актов об охране труда, а в Российской Федерации, по данным ГИБДД, ежегодно погибает более 26 тысяч человек в связи с нарушениями правил дорожного движения.

В таблице представлены данные Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН о значимости человеческого фактора в техногенных катастрофах.

Таблица

Коэффициент k_N значимости человеческого фактора [4]

№	Области техносферы	k_N
1	Атомная энергетика	0,55
2	Промышленное и гражданское строительство	0,70
3	Ракетно-космическая техника	0,35
4	Военная авиация	0,85
5	Гражданская авиация	0,65
6	Трубопроводный транспорт	0,30
7	Автомобильный транспорт	0,80
8	Технологическое оборудование	0,40

Из таблицы видно, что коэффициент значимости человеческого фактора k_N для важных отраслей промышленности имеет достаточно большие значения. Для автомобильного транспорта составляет 0,8 и занимает второе место после военной авиации, а для технологического оборудования — 0,4.

Для снижения значимости человеческого фактора, что за собой уменьшит вероятность возникновения аварий, катастроф и несчастных случаев, действует перечень нормативных документов, которые регламентируют условия труда, параметры машин и оборудования, предельно допустимые значения воздействия вредных веществ и т. д. Для разных стран перечень этих документов различен.

В Российской Федерации для обеспечения безопасных условий труда используют пять групп нормативных документов:

- гигиенические нормативные документы;
- систему стандартов безопасности труда;
- систему эргономических стандартов;
- технические регламенты;
- отраслевые и производственные инструкции по технике безопасности.

Гигиеническое нормирование

На конференции в Берлине в 1980 году пятнадцать государств приняли первые международные нормы по гигиене труда. После чего стали создавать центры, которые вплотную занимались гигиеной труда.

Технический прорыв в сфере радиоэлектроники во второй половине двадцатого века и появление приборов технического и медицинского назначения дали толчок к развитию гигиенических норм. Данные приборы позволили проводить замеры как характеристик технологического оборудования, так и реакции организма при изменении параметров и режимов работы машин.

Тогда встал вопрос о количественной оценке этих реакций (тяжесть и напряжённость, энергозатраты человека), составляли таблицы, переводили в различные балльные системы.

Одними из первых, кто занимался количественной оценкой при воздействии нагрузок на организм человека, были немецкий учёный Г. Леман и Э. Ацлер. Они создали институт физиологии труда в Берлине. В своей работе «Практическая физиология труда» Г. Леман представил систему баллов, которая позволяет количественно оценить воздействие на организм тех или иных видов нагрузок.

В данное время регламентированы факторы, которые вредно воздействуют на человека, благодаря многолетнему опыту.

К ним относятся: «физические факторы — температура, влажность, скорость движения воздуха, тепловое излучение; неионизирующие электромагнитные поля (ЭМП) и излучения — электростатическое

поле; постоянное магнитное поле (в т. ч. гипогеомагнитное); электрические и магнитные поля промышленной частоты (50 Гц); широкополосные ЭМП, создаваемые ПЭВМ; электромагнитные излучения радиочастотного диапазона; широкополосные электромагнитные импульсы; электромагнитные излучения оптического диапазона (в т. ч. лазерное и ультрафиолетовое); ионизирующие излучения; производственный шум, ультразвук, инфразвук; вибрация (локальная, общая); аэрозоли (пыли)» [4].

Причины, приводящие к снижению трудоспособности рабочего персонала

При необходимости изменения требований к персоналу, к интенсивности труда либо переоборудования производственных участков переподготовка обслуживающего персонала, изменения организационного характера приводят к организационному стрессу.

Провоцировать стресс могут эволюционные изменения. Ещё один из факторов — это неопределённость в ближайшем будущем, неуверенность рабочих в себе и в своих действиях.

К причинам субъективного характера относятся страхи, такие как: возможность совершения ошибки, потеря работы или вероятность не справиться с поставленной задачей. Вероятность совершения ошибочных действий персонала по причине «человеческого отказа» возрастает в ситуациях, несущих неопределённый характер (реструктуризация компании, политические изменения в стране и т. д.), в этот период возрастают психические нагрузки, конкуренция за рабочие места и т. д. Также большое влияние оказывает психологический климат в семье, так называемый непроизводственный стресс.

Факторов, влияющих на возникновение стресса, огромное количество, напряжение от их накопления даёт вероятность профессионального выгорания или хронической усталости, которая включает психологические, социальные, физиологические составляющие.

Симптомы накопившегося стресса:

- игнорирование правил техники безопасности;
- ухудшение качества производственных работ;
- раздражительность, нервозность, агрессивность;
- беспокойство, суетливость, повышенная тревожность;
- высокая конфликтность;
- неудовлетворённость работой;
- потеря концентрации внимания и рост числа ошибок;
- поиск оправданий вместо решения поставленных задач;
- общая негативная установка на жизненные перспективы;
- вредные привычки и злоупотребление ими.

В современном мире усложняется управление технологическими процессами, что влечёт за собой нагрузку на человека в виде новых правил, норм, требований и т. д. [3]. Технический прогресс за последние 40 лет шагнул значительно вперёд в машиностроительной и металлургической отраслях, а возможности человека-оператора отстают, что представлено на рисунке 1.

Психофизиологические факторы риска возникновения прецедентов аварии

Одной из сложных операций, с которыми сталкивается оператор, является перевод сигнала и адаптация его в реальный технологический процесс с принятием решения об изменении режимов работы оборудования.

Как оценить соблюдение норм безопасной эксплуатации обслуживаемого оборудования — это остаётся одним из важных вопросов.

Есть ряд качеств, которыми должен обладать сотрудник для выполнения своих профессиональных обязанностей:

- концентрация и быстрота переключения внимания;
- логическое мышление;
- скорость реакции;
- кратковременная память;
- особенности характера личности.

На рисунке 2 приведены факторы, которые входят в группу риска возникновения чрезвычайных ситуаций.

Невозможно составить перечень типичных ошибок, совершаемых человеком при

выполнении одной и той же работы. Это связано с функцией его психофизиологического состояния, а периодичность «человеческих отказов» связана с интенсивностью нагрузок и состоянием внешней среды.

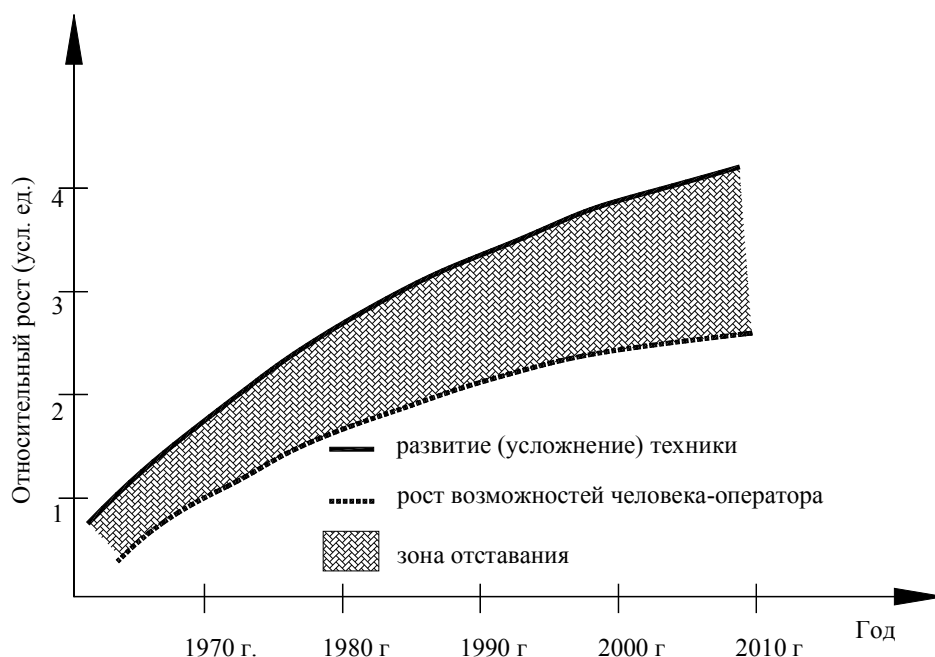


Рисунок 1 Схематическое изображение соотношения развития (усложнения) техники и роста возможностей человека-оператора

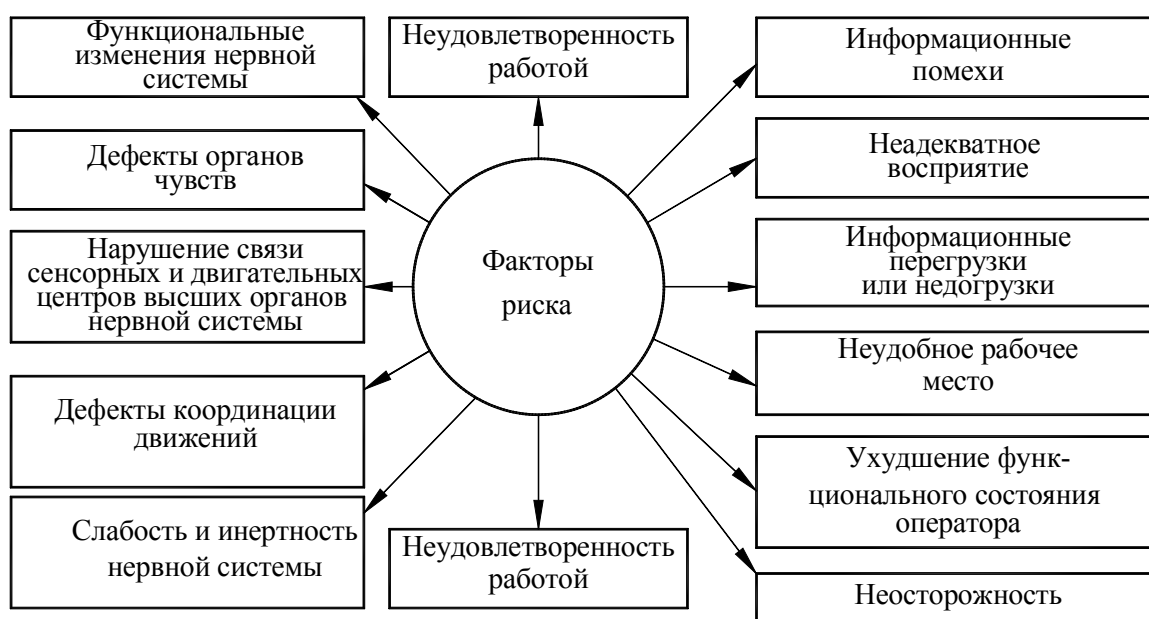


Рисунок 2 Факторы риска, способствующие возникновению чрезвычайной ситуации

Выводы. Вероятность отказа человека как одного из элементов технической системы достаточно высока (коэффициент значимости человеческого фактора $k_N = 0,8 \div 0,3$). Это связано с тем, что организм человека, который принимает участие в решении поставленных задач в разнообразных областях профессиональной деятельности, обладает рядом специфических свойств, как полезных, так и вредных. Совершение случайных ошибок, быстрое наступление усталости, случайная потеря информации, заведомо неправильное принятие решения и т. д. Техногенные катастрофы, аварии, несчастные случаи происхо-

дят на производстве из-за перечисленных вредных свойств организма человека при наличии на предприятиях нормативных документов, инструкций и т. д.

Преднамеренное или непреднамеренное совершение ошибочных действий персонала стремительно растёт в ситуациях, несущих неопределённый характер (реструктуризация, политические изменения в стране и т. д.), в такой период возрастают психические нагрузки. Также психологический климат в семье оказывает большое влияние на показатели «надёжности человека-оператора» (непроизводственный стресс).

Библиографический список

1. Вишневский, Д. А. Расчёт надёжности металлургического оборудования и производственного риска [Текст] / Д. А. Вишневский // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. — Вып. 7 (50). — С. 139–146.
2. ГОСТ 27.003–90. Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности. Термины и определения [Текст]. — Введ. 01.10.90. — М. : Госстандарт СССР, 1991. — 18 с.
3. Либерман, А. Н. Техногенная безопасность : человеческий фактор [Текст] / А. Н. Либерман. — СПб : ВИС, 2006. — 103 с.
4. Доброборский, Б. С. Безопасность машин и человеческий фактор [Текст] : монография / Б. С. Доброборский ; под ред. д.т.н., проф. С. А. Волкова ; СПбГАСУ. — СПб, 2011. — 111 с.
5. A fuzzy approach to the evaluation of human factors in ultrasonic nondestructive examinations / Jesús Domech Moré, Ari Sauer Guimarães, Geraldo Bonorino Xexéo, Ricardo Tanscheit // Journal of Industrial Engineering International. — 2007. — P. 5.

© Вишневский Д. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. ТМиК ЛНУ им. В. Даля Витренко В. А.

Статья поступила в редакцию 11.10.19.

к.т.н. Вишневський Д. О. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ВПЛИВ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА НА НАДІЙНІСТЬ МЕТАЛУРГІЙНОГО І МАШИНОБУДІВНОГО ОБЛАДНАННЯ

Проведено аналіз ймовірності відмови людини як одного з елементів технічної системи в металургійній і машинобудівній галузях.

Аналіз вказує на необхідність зміни підходу до розрахунку показників надійності обладнання у металургійній і машинобудівній галузях, а саме враховувати коефіцієнт значущості людського фактора.

Ключові слова: надійність обладнання, технічний регламент, людський фактор, відмова обладнання, надійність людського фактора.

PhD in Engineering Vishnevskiy D. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

INFLUENCE OF HUMAN FACTOR ON RELIABILITY OF THE METALLURGICAL AND MECHANICAL-ENGINEERING EQUIPMENT

There has been carried out the analysis of probability of human failure as one of a technical system component in metallurgical and machine-engineering branches.

The analysis points to the need to change the approach to the calculation of equipment reliability indicators in the metallurgical and machine-engineering industries, that is, to take into account the coefficient of importance of the human factor.

Key words: *equipment reliability, technical regulations, human factor, equipment failure, human factor reliability.*

УДК 536.252:532.527.2

к.т.н. Карпук И. А.,
Юрьев С. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СВЧ-ПЛАЗМОТРОНА

Показана возможность применения СВЧ-плазмотрона для розжига пылеугольного топлива в котлах. На основании анализа известных способов интенсификации теплоотдачи с цилиндрической поверхности предложен способ воздушного охлаждения рабочей камеры СВЧ-плазмотрона. Представлены условия, обеспечивающие равномерный проток воздуха сквозь поверхность рабочей камеры плазмотрона.

Ключевые слова: пылеугольное топливо, СВЧ-плазмотрон, теплообмен, вращающийся проливаемый цилиндр.

Введение. В последние годы в промышленности для обогрева помещений, нагрева воды или для получения насыщенного пара высокого давления всё чаще используют котлы на угле. Такие котлы считаются одними из самых экономичных, поскольку уголь — самый дешёвый вид топлива, что особенно актуально для энергетической структуры Донбасса.

Для розжига пылеугольных котлов и стабилизации процессов горения обычно применяют природный газ или мазут, стоимость которых постоянно растёт.

Поэтому актуальным является использование в качестве растопочного топлива угольной пыли, требующей, по сравнению с газом и мазутом, более высокой температуры воспламенения [1], которую способны развивать плазмтроны [2–3].

Воздействие плазмы на угольную пыль приводит к ряду положительных изменений в ней, например: частицы угля дробятся на более мелкие части, происходит их интенсивная газификация, вследствие этого повышаются реакционные свойства топлива, горение протекает более устойчиво [1]. Это является актуальным при сжигании низкосортных углей и позволяет осуществить растопку котла при кратковременной работе плазмтрона, необходимой для достижения растопочных параметров котла. Применяемые электродуго-

вые плазмтроны имеют существенный недостаток — износ электродов.

Наиболее оптимальным является использование в таких горелках СВЧ-плазмтронов. Они не требуют использования специальных угольных и медных электродов, а температура плазмы при СВЧ-разряде обычно 6000–7000 К, что способствует быстрому воспламенению углевоздушной смеси и её интенсивному выгоранию.

Однако в процессе длительной эксплуатации СВЧ-плазмтронов в такого рода горелках важной проблемой является отвод тепла с поверхности рабочей камеры, так как температура, создаваемая плазменным факелом, может достигать 800 К вблизи стенки камеры.

Целью данной работы является определение оптимального способа охлаждения рабочей камеры СВЧ-плазмтрона, используемого для розжига пылеугольного топлива.

Постановка задачи. Использование в качестве теплоотводящей среды воды осложняется тем, что плазмтроны работают при высоких значениях силы тока и напряжения. Обдув рабочей камеры воздухом малоэффективен из-за высокой температуры поверхности.

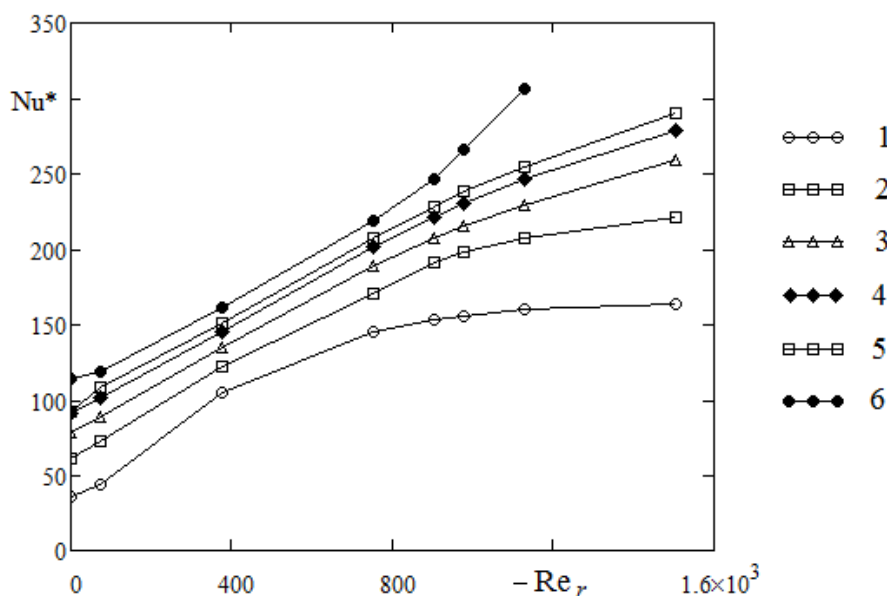
Однако система охлаждения воздухом может быть достаточно эффективной. Например, в случае вращения рабочей камеры плазмтрона в потоке газа возможно

увеличение теплоотдачи с её поверхности, так как известно [4], что в закрученных потоках жидкостей и газов существенно интенсифицируются процессы обмена импульсом, теплотой и массой.

Изложение материала и его результаты. Основными способами улучшения теплоотдачи с вращающейся цилиндрической поверхности являются: увеличение скорости вращения, наложение вынужденного осевого течения, нанесение на поверхности различной рельефной структуры (например, продольных пазов). Сравнительный анализ этих способов интенсификации теплообмена между вращающейся цилиндрической поверхностью и потоком газа [5] указывает на наличие недостатков. В частности, наличие рельефной структуры на поверхности незначительно увеличивает теплоотдачу, существенно повышая гидродинамические потери, а вынужденное осевое течение заметно усиливает теплоотдачу только при больших значениях скорости осевого потока.

Известны результаты [6–7], которые подтверждают возможность интенсификации теплообмена снаружи вращающегося проницаемого цилиндра за счёт протока газа через его поверхность. Такой способ существенно увеличивает теплоотдачу по сравнению с другими известными способами. На рисунке 1 представлены зависимости изменения коэффициента теплоотдачи — числа Нуссельта — от радиального числа Рейнольдса, характеризующего интенсивность протока газа через проницаемую цилиндрическую поверхность, при различной скорости вращения.

Представленная зависимость показывает, что фактор протока газа сквозь вращающуюся проницаемую поверхность позволяет весьма существенно (в 3–5 раз) повысить интенсивность теплообмена между вращающимся цилиндром и потоком газа, что заметно больше того эффекта, который, по данным обзора [5], могут обеспечить вынужденное осевое течение и пазы в цилиндрах.



1 — $Re_\phi = 4.1 \cdot 10^4$; 2 — $Re_\phi = 8.2 \cdot 10^4$; 3 — $Re_\phi = 1.24 \cdot 10^5$; 4 — $Re_\phi = 1.5 \cdot 10^5$;
5 — $Re_\phi = 1.65 \cdot 10^5$; 6 — $Re_\phi = 2 \cdot 10^5$

Рисунок 1 Зависимость числа Нуссельта от интенсивности протока воздуха через проницаемую цилиндрическую поверхность

Реализация такого метода охлаждения СВЧ-плазмотрона заключается в следующем (рис. 2). Вращающаяся рабочая камера плазмотрона имеет некоторое количество продольных щелей, через которые рабочий газ попадает в камеру. Газ подаётся в область между неподвижной внешней стенкой и вращающейся камерой.

Регулируя скорость вращения камеры и скорость потока (расход) рабочего газа, можно управлять структурой течения и, как следствие, степенью охлаждения камеры [8]. Кроме того, газ, проходя через поверхность вращающейся рабочей камеры, закручивается, что позволяет реализовать газовихревую стабилизацию плазмы.

Из-за вращения поверхности рабочей камеры в зазоре между рабочей камерой и неподвижной стенкой могут развиваться макровихревые структуры. Данные вихревые структуры снаружи вращающегося пронизываемого цилиндра сопровождаются неравномерностью протекания газа через его поверхность. Это явление нежелательно, поскольку приводит к очень сильному повышению локальных скоростей движения газа через перегородку.

В работе [4] показано, что возникающие в результате центробежной неустойчивости вихревые структуры могут блокировать значительную часть поверхности пронизываемого цилиндра для потока газа, вплоть до того, что весь подаваемый через входное сечение поток будет протекать через малую часть этой поверхности у самого входного сечения. Это явление сопровождается крайне неравномерным распределением радиальной скорости потока рабочего газа вдоль поверхности цилиндра.

Значительное влияние на характер течения и равномерность протекания газа оказывает сопротивление пористой перегородки [9].

По результатам численного моделирования было установлено [9], что с уменьшением сопротивления пористой перегородки часть поверхности пронизываемого цилиндра блокируется для потока жидкости. При этом площадь блокируемой поверхности растёт с увеличением скорости вращения. На рисунках 3, 4 приведены результаты, которые получены при нескольких фиксированных значениях Re_φ , Re_z и различном коэффициенте сопротивления пористой перегородки b_r .

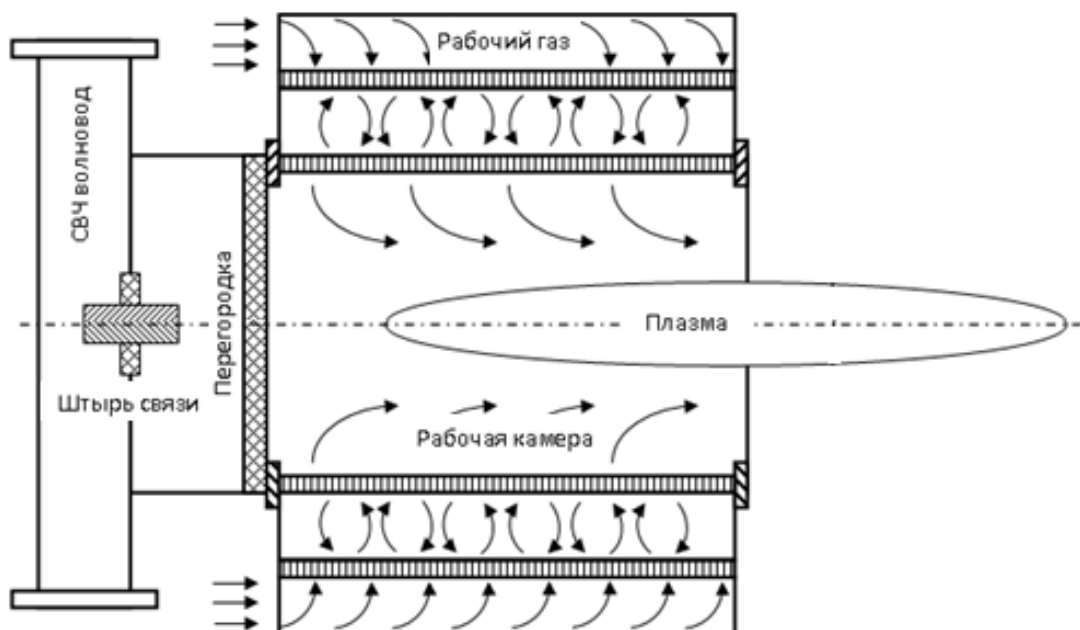


Рисунок 2 Схема воздушного охлаждения СВЧ-плазмотрона

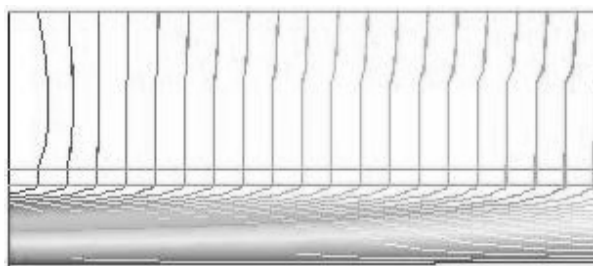


Рисунок 3 Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ($b_r = 10^{11} \text{ м}^{-2}$, $\text{Re}_\varphi = 10^4$, $\text{Re}_r = 100$)

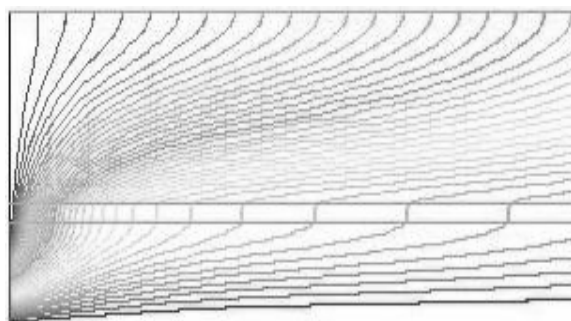


Рисунок 4 Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ($b_r = 10^4 \text{ м}^{-2}$, $\text{Re}_\varphi = 10^4$, $\text{Re}_r = 100$)

Для обеспечения равномерного протока газа сквозь поверхность вращающегося цилиндра необходимо задать сопротивление пористой щели в диапазоне $3.5 \cdot 10^5 (\text{Re}_r = 100) - 3.5 \cdot 10^8 (\text{Re}_r = 5000)$ для значений окружного числа Рейнольдса

от $\text{Re}_\varphi = 1 \cdot 10^4$ до $\text{Re}_\varphi = 2 \cdot 10^5$ [9]. При данных значениях сопротивления пористой щели неравномерность течения потока воздуха является технически приемлемой.

Выводы и направления дальнейших исследований. Применение наложенного вынужденного радиального течения воздуха через вращающуюся рабочую камеру СВЧ-плазмотрона позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи с его поверхности в 3–5 раз и использовать для его охлаждения воздух.

Равномерное охлаждение рабочей камеры обеспечивается путём распределения протока воздуха сквозь эту поверхность. Для этого необходимо задать коэффициент сопротивления пористой щели в диапазоне $3.5 \cdot 10^5 (\text{Re}_r = 100) - 3.5 \cdot 10^8 (\text{Re}_r = 5000)$ для значений окружного числа Рейнольдса от $\text{Re}_\varphi = 1 \cdot 10^4$ до $\text{Re}_\varphi = 2 \cdot 10^5$.

Однако на данный момент отсутствуют данные о влиянии гидродинамических потерь, возникающих при течении воздушно-го потока через пористую перегородку, на эффективность предложенного способа охлаждения СВЧ-плазмотрона и его работу.

Поэтому предметом дальнейших исследований в первую очередь должен стать учёт гидродинамических потерь, обусловленных вынужденным радиальным течением воздуха сквозь вращающуюся проницаемую поверхность рабочей камеры СВЧ-плазмотрона.

Библиографический список

1. Буров, В. Ф. СВЧ-плазмотрон со свободно парящим плазмодом [Текст] / В. Ф. Буров, Ю. В. Стрижко // Сб. докл. VI Всероссийской конференции «Горение твёрдого топлива». — Новосибирск : ИТ СО РАН, 2006.
2. Жуков, М. Ф. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела [Текст] / М. Ф. Жуков, Е. И. Карпенко, В. С. Перегудов и др. — Новосибирск : Наука, 1995. — 304 с.
3. Иманкулов, Э. Р. Плазменный розжиг и стабилизация горения факела донецкого АШ [Текст] / Э. Р. Иманкулов, В. Е. Мессерле, З. Е. Закипов, Т. М. Сейтимов, А. Б. Устименко // Теплоэнергетика. — 1990. — № 1. — С. 51–53.

4. Мочалин, Е. В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст]. Т. 8. Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах / Е. В. Мочалин, А. А. Халатов. — Киев : Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2010. — 428 с.

5. Мочалин, Е. В. Теплообмен и гидравлические потери в зазоре между вращающимися цилиндрами [Текст] / Е. В. Мочалин, С. А. Юрьев // Технологический аудит и резервы производства, 2013. — Вып. 3/1 (11). — С. 45–49.

6. Мочалин, Е. В. Интенсивность обмена импульсом и теплотой в потоке снаружи вращающегося пронизываемого цилиндра [Текст] / Е. В. Мочалин, С. А. Юрьев // Промислова гідроліка і пневматика. — 2011. — № 4 (34). — С. 11–14.

7. Юрьев, С. О. Теплообмін і тертя поблизу обертового проникного циліндра з протоком рідини через його поверхню [Текст] / С. О. Юрьев // Технологический аудит и резервы производства. — 2012. — № 5/1 (7). — С. 19–20.

8. Мочалин, Е. В. Интенсификация теплоотдачи от вращающегося цилиндра за счёт протока жидкости через его поверхность [Текст] / Е. В. Мочалин, С. А. Юрьев // Гидроаэромеханика в инженерной практике : материалы XVII международной научно-технической конференции. — Черкассы : АПБ им. Героев Чернобыля МЧСУ, 2012. — С. 73.

9. Юрьев, С. А. Особенности течения жидкости через вращающийся пористый цилиндр [Текст] / С. А. Юрьев // Сборник научных трудов ДонГТУ, 2015. — Вып. 2 (45). — С. 136–141.

© Карпук И. А.

© Юрьев С. А.

Рекомендована к печати к.т.н., проф., и.о. зав. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В., д.т.н., проф., зав. каф. физики ЛНУ им. В. Даля Корсуновым К. А.

Статья поступила в редакцию 11.10.19.

к.т.н. Карпук І. А., Юр'єв С. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ЗАСТОСУВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ТЕЧІЇ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ НВЧ-ПЛАЗМОТРОНА

Показано можливість застосування НВЧ-плазмотрона для розпалювання пилувугільного палива в котлах. На підставі аналізу відомих способів інтенсифікації тепловіддачі з циліндричної поверхні запропоновано спосіб повітряного охолодження робочої камери НВЧ-плазмотрона. Представлено умови, що забезпечують рівномірний протік повітря крізь поверхню робочої камери плазмотрона.

Ключові слова: пилувугільне паливо, НВЧ-плазмотрон, теплообмін, обертовий проникний циліндр.

PhD in Engineering Karpuk I. A., Yuryev S. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

USING OF RADIAL AIRFLOW FOR MICROWAVE PLASMA TORCH COOLING

The applicability of microwave plasma torch for ignition of pulverized coal fuel in vessels is shown. Based on the analysis of known methods of intensification of heat transfer from the cylindrical surface, a method of air cooling of the operating chamber of microwave plasma torch is proposed. The conditions ensuring uniform air flow through the surface of the operating chamber of the plasma torch are presented.

Key words: pulverized coal fuel, microwave plasma torch, heat exchange, rotating permeable cylinder.

УДК 664.73.05

Спорняк В. Г.,
к.т.н. Левченко Э. П.,
к.т.н. Левченко О. А.,
Карпук И. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЖУЩЕ-УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

Выполнены расчёты основных параметров вертикального двухступенчатого измельчителя режуще-ударного действия. Определены мощности на отдельных технологических этапах обработки исходного сырья и сделана интегральная оценка суммарной мощности измельчительной машины в целом. Проведена оценка удельной энергоёмкости сравниваемых измельчителей.

Ключевые слова: вертикальный режуще-ударный измельчитель, резание, удар, мощность, аналитический расчёт.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из главных направлений повышения эффективности работы дробильно-измельчительных машин является комбинирование в рабочей камере различных условий наложения нагрузки на материал, рационально учитывающих физико-механические свойства исходного сырья в зависимости от его размеров и состояния.

Недостатком имеющихся конструкций подобных измельчителей [1, 2] всё ещё являются повышенная энерго- и металлоёмкость, а также низкая производительность, обусловленная недостаточной пропускной способностью и относительно значимыми затратами ручного труда.

Поэтому актуальным направлением является разработка и создание дробильно-измельчительных машин максимально компактного исполнения и металлоёмкости, обладающих наравне со сравнительно малыми энергозатратами высокой удельной производительностью, что рационально обосновывается вертикальной компоновочной схемой, обеспечивающей отсутствие дополнительных сопротивлений движению измельчаемого материала при его транспортировании на разных технологических этапах работы машины.

Постановка задачи. Задачей исследований является повышение эффективности работы двухступенчатого вертикального

измельчителя режуще-ударного действия за счёт создания преимущественных условий режущего и ударного разрушения материала на различных стадиях его фрагментирования по высоте рабочей камеры.

В зависимости от интегральной оценки затрат энергии при резании и ударном измельчении, а также обеспечения выгрузки готового продукта определяется необходимая суммарная мощность требуемого электродвигателя, удовлетворяющая поставленным условиям компоновочной схемы.

Изложение материала и его результаты. Аналитический обзор существующих источников информации по данному направлению выявил, что для гарантированного обеспечения необходимого гранулометрического состава готового продукта измельчительные машины подобного типа снабжаются решетчатой или зубчатой деккой, а также ситовой решёткой, что приводит к лишним энергозатратам на преодоление их действия вследствие взаимного контакта с перерабатываемым сырьём, к дополнительному расходу электроэнергии. Кроме того, зачастую для выгрузки полученной массы применяются дополнительные устройства, например выгрузочные шнеки, что также не способствует снижению удельных энергозатрат и металлоёмкости данных машин в целом.

А необходимость применения при обслуживании ручного труда в негативной мере сказывается как на эффективности работы, так и на производительности.

Основными отличительными особенностями предложенного измельчителя [3] являются новизна и эффективность его компоновочной схемы и кинематики движения рабочих органов (рис. 1).

При работе измельчителя исходный продукт подаётся через загрузочную горловину 1 на первую ступень измельчения за счёт резания ножами 3, закреплёнными на диске 4, при этом происходит предварительное разрушение материала на отдельные фрагменты. В дальнейшем предварительно полученные частицы поступают на вторую ступень измельчения в зону действия молоткового барабана 5, где окончательно измельчаются, оседают вниз

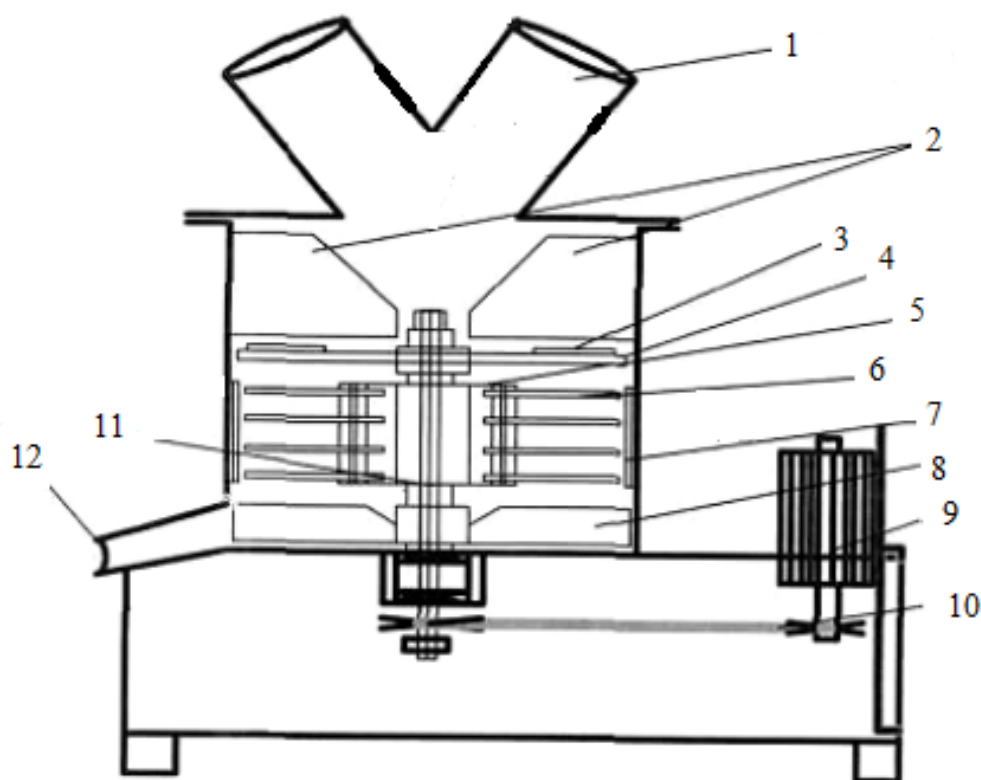
рабочей камеры и выбрасываются из неё швырялкой 8 через разгрузочное приспособление 12.

Для подтверждения повышения производительности и снижения энергозатрат был проведён теоретический расчёт энергоёмкости процесса измельчения початков кукурузы.

Расчёт энергии резания E_0 (режущая пара, диск с ножами и противорез) проводился на основе данных эксперимента на маятниковом копре [1–3].

Принимаем $E_0 = 5,3$ Дж, средний диаметр початка кукурузы $d = 0,04$ м. При средней высоте одного резания $h_{cp} = 0,006$ м рассчитываем объём массы, снятой за один проход ножа:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h_{cp}. \quad (1)$$



1 — загрузочная горловина; 2 — противорезы; 3 — ножи; 4 — диск; 5 — молотковый барабан; 6 — диски; 7 — дека; 8 — швырялка; 9 — электродвигатель; 10 — клиноременная передача; 11 — вертикальный вал; 12 — разгрузочное приспособление

Рисунок 1 Компоновочная схема двухступенчатого режуще-ударного измельчителя

Энергия, приходящаяся на 1 м³ резаного материала:

$$E_v = \frac{E_0}{V}, \quad (2)$$

где E_0 — энергия резания; V — объём материала.

Принимая среднюю плотность початков кукурузы $\rho = 600$ кг/м³, получим энергию на 1 кг сырья:

$$E' = \frac{E_v}{\rho}. \quad (3)$$

При производительности $Q = 1000$ кг/ч = 0,27 кг/с мощность, затрачиваемая на резание, будет равна

$$N_{рез} = E' \cdot Q. \quad (4)$$

При ударе с начальной скоростью V_0 , за время dt материал деформируется на величину d_x :

$$d_x = V_0 \cdot dt. \quad (5)$$

Общая длина участка, участвующая в деформации, равна

$$dl = c \cdot dt, \quad (6)$$

где c — скорость звука в упругой среде.

При этом относительная деформация

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{d_x}{dl} = \frac{V_0 \cdot dt}{c \cdot dt} = \frac{V_0}{c}. \quad (7)$$

Скорость звука в упругой среде находится по формуле

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (8)$$

где E — модуль упругости; ρ — плотность материала.

При упругой деформации

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{SE}, \quad (9)$$

где $\frac{\Delta l}{l}$ — относительное удлинение;

Δl — удлинение; l — длина образца; F — усилие; S — площадь образца.

При этом напряжение (кгс/м²) будет равно

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (10)$$

Подставляя уравнение (9) в (10), получим

$$\sigma = \frac{\Delta l}{l} \cdot E = \frac{V_0 \cdot E}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} = V_0 \cdot \sqrt{\rho \cdot E}. \quad (11)$$

Отсюда

$$V_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{\rho \cdot E}}. \quad (12)$$

Из условия разрушения, когда кинетическая энергия равна максимальной потенциальной энергии упругой деформации

$$\frac{K \cdot \Delta X^2}{2} = \frac{m \cdot V^2}{2}, \quad (13)$$

где K — коэффициент упругости; ΔX — удлинение.

Коэффициент упругости:

$$K = \frac{F}{\Delta l} = l \cdot S \cdot E. \quad (14)$$

Исходя из уравнений (13) и (14), максимальное напряжение

$$F_{\max} = K \cdot \Delta X. \quad (15)$$

Отсюда

$$F_{\max} = \sigma_{\max} \cdot S. \quad (16)$$

Подставляя в уравнение (15) плотность ρ и начальную скорость V , получим

$$\sigma_{\max} \cdot S \cdot \Delta X = \rho \cdot S' \cdot l \cdot V^2, \quad (17)$$

где S' — сечение образца.

Отсюда

$$\sigma_{\max} \cdot \frac{\Delta X}{l} = \rho \cdot V^2. \quad (18)$$

Так как из уравнения (18)

$$\frac{\Delta X}{l} = \frac{\sigma_{\max}}{E}, \quad (19)$$

то соотнося уравнения (18) и (19), получаем

$$\frac{\sigma_{\max}^2}{E} = \rho \cdot V^2. \quad (20)$$

Исходя из уравнения (20), выражение для начальной скорости

$$V^2 = \frac{\sigma^2}{\rho \cdot E}, \quad (21)$$

или

$$V_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{\rho \cdot E}}, \quad (22)$$

что соответствует предыдущим результатам.

Далее ведём расчёт минимального расстояния от оси вращения, где будет выполняться условие разрушения:

$$V_0 = \omega \cdot r, \quad (23)$$

где ω — угловая скорость вращения барабана; r — расстояние от оси вращения.

Отсюда находится радиус вращения:

$$r = \frac{V_0}{\omega}. \quad (24)$$

Затрачиваемая барабаном мощность находится по формуле

$$N_{\text{бар}} = \frac{Q \cdot V^2}{2} = \frac{Q \cdot \sigma^2}{\rho \cdot E}. \quad (25)$$

При выходе готовой массы из дробилки во вращающейся системе отсчёта действуют следующие силы.

Центробежная сила инерции:

$$F_{\text{ц}} = m \cdot \omega^2 \cdot x. \quad (26)$$

Сила нормального давления:

$$F_{\text{н}} = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot V \cdot \sin \alpha. \quad (27)$$

Кориолисова сила инерции:

$$V_k = 2 \cdot \left[\bar{\omega} \cdot V_{\text{ом}} \right] \cdot \sin \alpha,$$

где $\sin \alpha = 1$.

При этом

$$F \cdot t = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot V_{\text{ом}} \cdot f. \quad (28)$$

Силой тяжести можно пренебречь, т. к. $\omega^2 x \gg g$.

Получим уравнение относительного движения:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = m \cdot \omega^2 \cdot x - 2 \cdot m \cdot \omega \cdot f \cdot V_{\text{ом}}. \quad (29)$$

Так как $V_{\text{ом}} = \frac{dx}{dt}$, то, подставляя в уравнение (29), получаем

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + 2 \cdot m \cdot \omega \cdot f \cdot \frac{dx}{dt} - m \cdot \omega^2 \cdot x = 0. \quad (30)$$

После сокращения массы

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2 \cdot \omega \cdot f \cdot \frac{dx}{dt} - \omega^2 \cdot x = 0. \quad (31)$$

Характеристическое уравнение находится в виде

$$\kappa^2 + 2 \cdot \omega \cdot f \cdot \kappa - \omega^2 = 0, \quad (32)$$

откуда

$$\begin{aligned} \kappa &= -\omega \cdot f \pm \sqrt{f^2 \cdot \omega^2 + \omega^2} = \\ &= -\omega \cdot \left(f \pm \sqrt{1 + f^2} \right). \end{aligned} \quad (33)$$

Исходя из этого, расстояние от оси вращения

$$x = c_1 \cdot e^{k_1 \cdot t} + c_2 \cdot e^{k_2 \cdot t}. \quad (34)$$

Согласно [7–9] $f = 0,57$, тогда

$$\sqrt{1 + f^2} = \sqrt{1 + 0,57^2} = 1,15, \quad (35)$$

$$f - \sqrt{1 + f^2} = 0,57 - 1,15 = -0,58, \quad (36)$$

$$f + \sqrt{1 + f^2} = 0,57 + 1,15 = 1,72. \quad (37)$$

При угловой скорости вращения ротора $\omega = 314$ (3000 об/мин)

$$K_1 = 180; K_2 = -540.$$

$$x = c_1 \cdot e^{180 \cdot t} + c_2 \cdot e^{-540 \cdot t}. \quad (38)$$

При $t = 0$, $x = \frac{R}{2} = 0,09$ м, $V_o = 0$.

$$V = 180 \cdot c_1 \cdot e^{180 \cdot t} - 540 \cdot c_2 \cdot e^{-540 \cdot t}. \quad (39)$$

$$C_1 + C_2 = 0,09; \quad 180 \cdot c_1 - 540 \cdot c_2 = 0;$$

$$C_1 = \frac{540}{180} \cdot C_2 = 3 \cdot C_2; \quad 4 \cdot C_2 = 0,09;$$

$$C_2 = \frac{0,09}{4} = 0,0225; \quad C_1 = 0,0675.$$

$$V = 0,067 \cdot e^{180 \cdot t} - 0,025 \cdot c_2 \cdot e^{-540 \cdot t}. \quad (40)$$

$$\text{При периоде } T = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с;}$$

$$t = 0,01 \text{ с; } x = 0,0675 \cdot t^{1,8} + 0,00225 \cdot t^{-5,4} \text{ м;}$$

$$t = 0,005 \text{ с; } x = 0,0675 \cdot t^{0,90} + 0,00225 \cdot t^{-2,7} \text{ м.}$$

При расстоянии $x = 0,181 \text{ м}$

$$t = \frac{\ln \frac{0,181}{0,0675}}{180} = 0,0054 \text{ с;}$$

$$V_{on} = 180 \cdot 0,0675 \cdot t^{180 \cdot 0,0054} - 540 \cdot 0,0225 \cdot t^{-540 \cdot 0,0054}. \quad (41)$$

Таким образом, минимальную скорость выхода готового продукта из разгрузочно-го устройства принимаем $V_o = 32 \text{ м/с}$.

Расчёт угла наклона выгрузной горловины по отношению к движению материала

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_{on}}{V_{onp}}. \quad (43)$$

Принимаем $\alpha = 30^\circ$.

Скорость составит

$$V = \sqrt{V_{cn}^2 + V_{onp}^2}. \quad (44)$$

Мощность швырялки

$$N_{шв} = \frac{Q \cdot V^2}{2}. \quad (45)$$

Схема сил, действующих на частицу материала, находящуюся на лопасти швырялки приведена на рисунке 2.

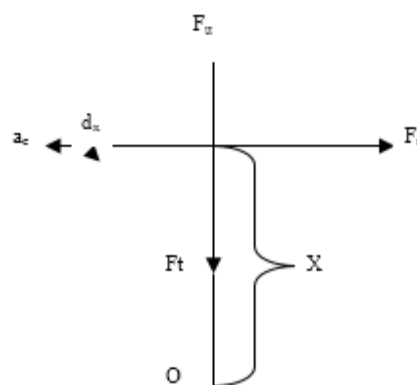


Рисунок 2 Схема сил, действующих на частицу, находящуюся на лопасти швырялки

Суммарная мощность на всех этапах процесса

$$N = N_{рез} + N_{бар} + N_{шв}. \quad (46)$$

Принимаем $N = 3 \text{ кВт}$.

По сравнению с другими измельчителями типа КДУ-2,0, ДЗГ-Т-350×63-1, ИУ-Ф-10 удельная энергоёмкость предлагаемой конструкции машины является значительно меньшей (табл. 1).

Таблица 1

Удельная энергоёмкость сравниваемых измельчителей

Модели измельчителей	Производительность, кг/ч	Мощность, кВт	Удельная энергоёмкость, кВт/кг
ДЗГ-Т-350×63-1	300	1,5	0,005
ИУ-Ф-10	2500	37,0	0,015
КДУ-2,0	2000	30	0,015
Проектируемая модель	1000	3	0,003

В результате выполненных теоретических исследований установлено, что преимущества при разрушении початков кукурузы принадлежат проектируемой конструкции, реализация которой может быть заложена при проектировании экспериментального и опытного образцов универсального измельчителя для проведения исследований в типовых производственных условиях.

Выводы и направление дальнейших исследований. Проведённые расчёты позволяют определить рациональную окружную скорость резания сырья, составляющую $V_0 = 50$ м/с; минимальное рас-

стояние от оси вращения, где будет осуществляться ударное разрушение частиц материала $r = 0,159$ м; минимальную скорость выхода готовой массы из разгрузочного устройства в пределах $V_{оп} = 32$ м/с; угол наклона разгрузочной горловины по отношению к движению материала, составляющий 30 градусов.

Определены затраты мощности на всех этапах процесса переработки сырья: на процесс резания $N_{рез} = 316$ Вт; на процесс ударного разрушения $N_{дар} = 1710$ Вт; на процесс выгрузки $N_{ув} = 570$ Вт. Общие затраты мощности составляют $N_{общ} = 2596$ Вт.

Библиографический список

1. Ялпачик, Ф. Е. Кормодробилки : конструкция и расчёт [Текст] / Ф. Е. Ялпачик, Г. С. Ялпачик, Н. Л. Крыжачковский и др. — Запорожье : Коммунар, 1992. — 292 с.
2. Пат. 28308А Украина, МКИ А 01F29/10, В 02C18/22. Малогабаритный универсальный фермерский измельчитель-смеситель кормов / В. И. Шаповалов, С. Ф. Вольвак, З. У. Болотошвили ; заявл. 21.05.96 ; опубл. 16.10.00, Бюл. № 5. — 3 с.
3. Декларационный патент № 16438 Украина, МКИ В 02 С 13/14. Двухступенчатый измельчитель кочанов кукурузы / Н. В. Брагинец, В. Г. Спорняк. — № u200600693 ; заявл. 26.01.06 ; опубл. 01.08.06, Бюл. № 8. — 3 с.
4. Брагинец, Н. В. Экспериментальные исследования ножей разных типов на маятниковом копре [Текст] / Н. В. Брагинец, В. Г. Спорняк, Ф. Г. Спорняк // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія : Технічні науки. — Луганськ : Видавництво ЛНАУ, 2005. — № 49/72. — С. 87–92.
5. Брагинец, Н. В. Обоснование и выбор конструктивно-технологической схемы измельчителей початков кукурузы для малых ферм [Текст] / Н. В. Брагинец, С. Ф. Вольвак, В. Г. Спорняк // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія : Технічні науки. — Луганськ : Видавництво ЛНАУ, 2004. — № 42/54. — С. 38–44.
6. Голик, М. Г. Хранение и обработка початков и зерна кукурузы [Текст] : учебное пособие технологических специальностей вузов пищевой промышленности / М. Г. Голик. — М. : Колос, 1968. — 333 с.
7. Резник, Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчёта режущих аппаратов [Текст] / Н. Е. Резник. — М. : Машиностроение, 1975. — 311 с.
8. Овчинников, А. А. К вопросу обоснования параметров измельчителя-смесителя непрерывного действия [Текст] / А. А. Овчинников, Е. В. Сурменев, А. И. Влазнев // Механизация заготовки, приготовления и раздачи кормов. — Саратов, 1982. — С. 28–32.
9. Кононов, Б. В. Анализ процесса выгрузки кормовой смеси в измельчителе-смесителе непрерывного действия [Текст] / Б. В. Кононов, А. К. Цейтлер // Эксплуатация машин в коневодстве. — Саратов, 1985. — С. 19–23.

© Спорняк В. Г.

© Левченко Э. П.

© Левченко О. А.

© Карпук И. А.

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

Статья поступила в редакцию 03.10.19.

Спорняк В. Г., к.т.н. Левченко Е. П., к.т.н. Левченко О. О., Карпук І. А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЕРТИКАЛЬНОГО РІЖУЧО-УДАРНОГО ПОДРІБНЮВАЧА

Виконано розрахунки основних параметрів вертикального двохступеневого подрібнювача ріжучо-ударної дії. Визначено потужності на окремих технологічних етапах обробки вхідної сировини та зроблено інтегральну оцінку сумарної потужності здрібнювальної машини у цілому. Проведено оцінку питомої енергоємності порівнювальних подрібнювачів.

Ключові слова: вертикальний ріжучо-ударний подрібнювач, різання, удар, потужність, аналітичний розрахунок.

Sporniak V. G., PhD in Engineering Levchenko E. P., PhD in Engineering Levchenko O. A., Karpuk I. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

SUBSTANTIATION OF THE MAIN PARAMETERS OF THE VERTICAL CUTTING AND IMPACT CRUSHER

There have been carried out calculations of the main parameters of the vertical two-stage crusher of cutting and impact action. The capacities were defined at separate technological stages of processing of initial raw materials and the integral assessment of total crusher capacity as a whole is made. The specific energy intensity of the compared crushers is assessed.

Key words: vertical cutting and impact crusher, cutting, impact, capacity, analytical calculation.

УДК 621.92

Павлиненко О. И.,
Власенко Д. А.,
к.т.н. Левченко Э. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРИЁМЫ ОБОСНОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАСКАЛЫВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ СТЕСНЁННЫМ УДАРОМ

На основании контактной теории ударного взаимодействия упругих тел, предложенной Герцем, проведено аналитическое исследование условий разрушения шарообразных тел при ударном контакте и обоснованы зависимости для определения основных параметров процесса раскалывания стальной дробы стеснённым ударом. В результате получены зависимости для определения необходимых скоростей соударения, диаметров и масс ударного элемента и дробы для обеспечения условий гарантированного разрушения материала.

Ключевые слова: стеснённый удар, раскалывание, дробь, теория контактного взаимодействия Герца, контактные напряжения, скорость соударения, масса ударного элемента.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Дробеструйные работы с применением колотой стальной дробы выполняются при очистке различных металлических поверхностей трубопроводов, поковок, металлопроката, для дополнительного упрочнения деталей, работающих под нагрузкой, при очистке котельных агрегатов, различных поверхностей перед покраской и прочих подготовительных работах. Правильный анализ и обоснование подготовки стальной колотой дробы для дробеструйных и дробемётных работ является залогом обеспечения высокого качества очистки металлических конструкций и деталей.

Дробь стальная литая выпускается в полном соответствии с российскими нормами по ГОСТ 11964–81 [1], а также установленными международными требованиями и стандартами. Литая дробь производится из расплавленного металла по технологии, позволяющей получить абразив с высокими показателями стойкости и упругости. Различают три основных способа получения абразивного материала: дробление струи расплавленного металла механическим способом, распыление жидкого металла с помощью форсунок, диспергирование потоками энергоносителя. Наи-

большее распространение получил метод механического дробления (раскалывания), при котором колотая дробь получается с помощью дробления сферической литой дробы и имеет форму неправильного многогранника. Для получения колотой дробы производится плавка стали, литьё сферической дробы и последующее её дробление в специальных ударных или шаровых мельницах или валковых дробилках.

Постановка задачи. Задачей данных исследований являются анализ и математическое обоснование зависимостей основных параметров процесса раскалывания металлической дробы с помощью стеснённого удара на основании положений классической теории упругости Герца при контактном взаимодействии.

Изложение материала и его результаты. Для математического моделирования условия разрушения металлической дробы стеснённым ударом [2, 3] необходимо определить основные параметры контактного взаимодействия ударного элемента и разрушаемого материала: массу ударного элемента и его скорость при ударном контактном взаимодействии с дробимым материалом. Для их определения приняты следующие допущения:

– дробь представляется в виде шара;

– силами трения при ударном контакте ударного элемента и дробин пренебрегаем (вследствие их незначительного влияния на параметры процесса раскалывания);

– при дроблении на все дробинки действует прямой упругий центральный удар;

– условно принимаем, что при ударном взаимодействии отсутствует относительное движение (скольжение) по поверхности дробимого материала.

Для разрушения упругого материала необходимо создать в нём достаточное напряжение [4, 5].

Предположим, что при контакте ударного элемента с дробинками, находящимися на рабочей поверхности, происходит одноосная деформация (сжатие), при которой обеспечиваются предельные условия перехода в пластическое состояние, а критерий разрушения целостности дробимого материала (первая теория прочности) имеет, соответственно, следующий вид [4, 5]:

$$\sigma_{дин} \leq \sigma_{уд}, \quad (1)$$

где $\sigma_{дин}$ — динамический предел прочности раскалываемого материала, МПа [4]:

$$\sigma_{дин} = k_{\partial} \sigma_{ст.сж}, \quad (2)$$

где k_{∂} — коэффициент отношения динамического предела прочности материала к статическому (определяется экспериментально или на основании предыдущих исследований [5, 6]); $\sigma_{ст.сж}$ — статический предел прочности на сжатие материала, МПа [4, 5];

$\sigma_{уд}$ — напряжение, возникающее в отдельных дробинках при соударении с ударным элементом, МПа.

В реальных условиях статический предел прочности на сжатие для сталей значительно превышает предел прочности при растяжении и определяется при помощи следующей аналитической зависимости:

$$\sigma_{ст.сж} = k_{\sigma} \sigma_{ст.р}, \quad (3)$$

где k_{σ} — коэффициент пропорциональности статического и динамического преде-

лов прочности материала [6]; $\sigma_{ст.р}$ — статический предел прочности на растяжение (сжатие) дробимого материала, МПа [4].

Контактное взаимодействие слоя дробин, ударных элементов и рабочей поверхности представлено на схеме (рис. 1).

Определим напряжение, возникающее в материале при ударе по слою дробин, с помощью математической модели упругого контакта Герца [7] простых поверхностей.

В первую очередь необходимо определить параметр χ , называемый местным смятием тел, величина которого равна отношению смещению центров масс молота и дробинки. Термин «смятие» употребляется в связи с тем, что относительное перемещение соударяемых тел при силовом контакте происходит в основном вследствие деформации (смятия) их в зоне касания [7].

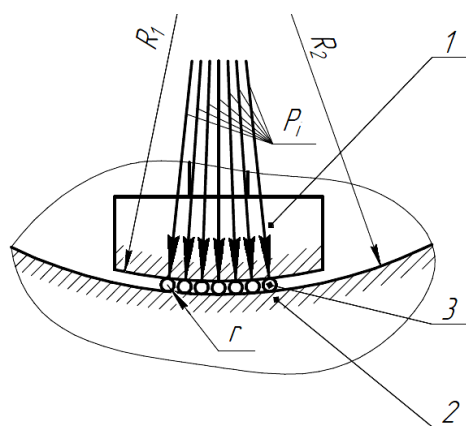
В момент обращения скорости ударного элемента относительного смещения $\dot{\chi}$ при ударном контакте в ноль величина χ достигает максимального значения:

$$\chi_{\max} = \left(\frac{10 m_y V^2}{4 K} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (4)$$

где m_y — масса ударного элемента, кг; V — скорость, при которой происходит соударение [5, 7], м/с; K — коэффициент, зависящий от геометрических и физико-механических свойств материалов ударного элемента и дробин:

$$K = \frac{4 \sqrt{\frac{r R_1}{r + R_1}}}{3 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (5)$$

где r — радиус дробинки, м; R_1 — радиус кривизны рабочей поверхности ударного элемента, м; μ_1, μ_2 — коэффициенты Пуассона материалов ударного элемента и дробинки, E_1, E_2 — модули упругости материалов взаимодействующих тел, МПа.



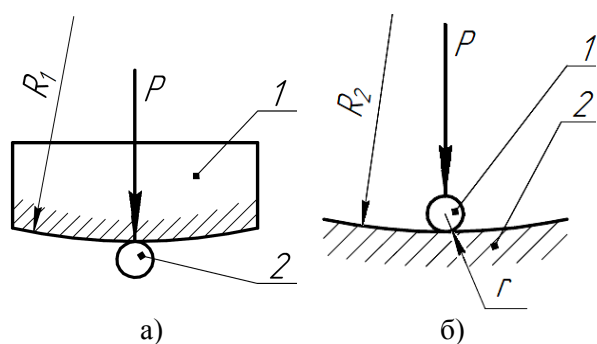
1 — ударный элемент; 2 — рабочая поверхность;
3 — слой дроби

Рисунок 1 Схема взаимодействия ударного элемента с дробью и рабочей поверхностью

Согласно исследованиям [7] сила удара при контакте сферических тел при условии, когда одно тело неподвижно, а другое ударяется со скоростью V , определяется как

$$P_y = K \left(\frac{5 m_y V^2}{4 K} \right)^{\frac{3}{5}}. \quad (6)$$

Рассмотрим условие контакта ударного элемента с дробью и рабочей поверхностью (рис. 2).



а) при контакте с ударным элементом
(1 — ударный элемент; 2 — дробь);
б) при контакте с рабочей поверхностью
(1 — дробь; 2 — рабочая поверхность)

Рисунок 2 Схема для определения основных параметров взаимодействия с дробью

При ударном контакте происходит деформация взаимодействующих тел и возникают напряжения, определяемые по зависимостям, основанным на решении задачи Герца об упругом контакте тел сферической формы, имеющим решение в замкнутой форме [7, 8]:

– для контактного взаимодействия с рабочей поверхностью ударного элемента и дробинки (рис. 2, а):

$$Q_1 = 0,918 \sqrt[3]{P_y \frac{\left(\frac{r+R_1}{2rR_1} \right)^2}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^2}}; \quad (7)$$

– для ударного контакта дробинки с рабочей поверхностью (рис. 2, б):

$$Q_2 = 0,918 \sqrt[3]{P_y \frac{\left(\frac{R_2-r}{2rR_2} \right)^2}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^2}}, \quad (8)$$

где R_2 — радиус кривизны рабочей поверхности, м.

По результатам численного решения определено, что наибольшее напряжение в дробинке возникает в зоне контакта с ударным элементом.

Для обеспечения требуемой массовой производительности необходимо реализовать гарантированное разрушение (раскалывание) материала при одиночном ударном взаимодействии ударного элемента с необходимым количеством дробимого материала, обладающего идентичной структурой и физико-механическими свойствами $N_{др}$. В этом случае сила удара равномерно распространяется на весь дробимый материал.

Исходя из этого, формула, основанная на теории контактного взаимодействия Герца [7], для определения нормального напряжения, возникающего на площадке

контакта двух тел (с учётом зависимостей (1–6)), будет выглядеть

$$Q_n = 0,628 \frac{\sqrt[5]{V^2 m_y \Theta^4 R_{np}^3}}{\sqrt[3]{N_{dp}}}, \quad (9)$$

где Θ — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материалов ударного элемента и дроби:

$$\Theta = \left(\frac{E_1 E_2}{E_1 (1 - \mu_1^2) - E_2 (\mu_2^2 - 1)} \right), \quad (10)$$

где R_{np} — приведённый радиус кривизны поверхности контактирующих тел, м:

$$R_{np} = \frac{r + R_1}{r R_1}. \quad (11)$$

Из формулы (9) получаем зависимость для определения максимального количества дробин, при котором обеспечивается их раскалывание в процессе реализации одиночного стеснённого удара:

$$N_{dp} = 0,248 \frac{\sqrt[5]{(V^2 m_y \Theta^4 R_{np}^3)^3}}{(\sigma_{дин})^3}. \quad (12)$$

Для наглядного отображения зависимости количества дробин, раскалываемых при наложении одиночного центрального упругого ударного контакта рабочим органом, от массы ударного элемента и его скорости при взаимном контакте с массивом материала (12) на рисунке 3 отображён пространственный график поверхности в зависимости от массы ударника в пределах от 100 до 200 кг и от скорости соударения от 1 до 3 м/с.

При расчётах задавались следующие значения параметров, входящих в зависимость (12): материал дроби — сталь литая 80ГСЛ [1] с твёрдостью 450–470 HV и пределом статического временного сопротивления на сжатие $\sigma_{ст.сж} = 1020$ МПа (коэффициенты пропорциональности: $k_\sigma = 1,7$, $k_\sigma = 1,8$); радиус отдельной дробинки — 3 мм. При этом радиус кривизны рабочей поверхности ударного элемента задавался 1 м. Модуль упругости и коэффициент Пуассона для материала дроби принимались 205 ГПа и 0,33 соответственно.

На рисунке 3 отображён график зависимости (12) для идеальных условий контакта ударного элемента с дробью.

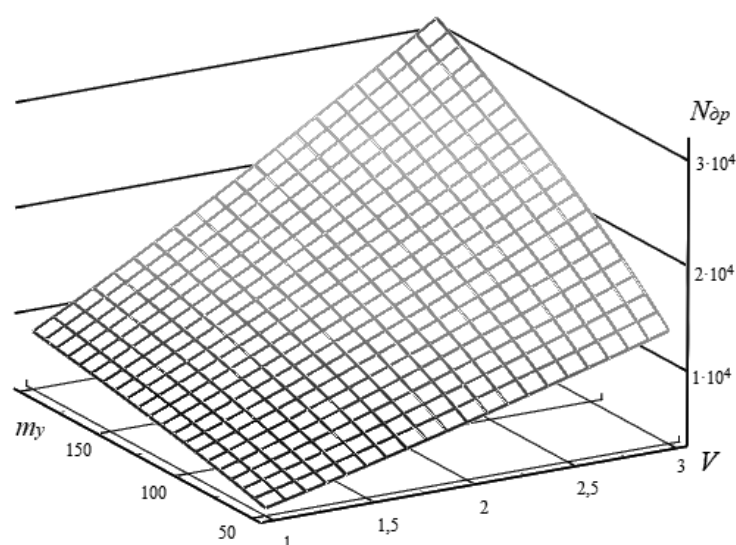


Рисунок 3 График зависимости количества частиц дроби, раскалываемых одиночным ударом молота, от массы ударного элемента и его скорости

Для анализа влияния величин массы и скорости ударного элемента на количество раскалываемых дробинok отображены графики зависимости (12) с фиксированными значениями $m_y = 100$ кг (рис. 4) и $V = 3$ м/с (рис. 5).

Как видно из графиков, представленных на рисунках 4 и 5, скорость удара влияет на количество раскалываемой дробин в степенной зависимости с иррациональным показателем больше единицы, а масса — в степенной зависимости с положительным иррациональным показателем меньше единицы. Это даёт возможность утверждать, что скорость удара оказывает большее воздействие на эффективность раскалывания дробин по сравнению с влиянием массы ударного элемента при одинаковых условиях. При увеличении этих показателей влияние массы снижается, а скорости — повышается.

Для обоснования основных технологических параметров процесса ударного контакта при дроблении материала, требующихся для обеспечения определённых условий раскалывания материала при стеснённом ударе, предлагается использовать следующие теоретические закономерности:

– для определения требуемой массы ударного элемента:

$$m'_y = \frac{468(\sigma_{дин})^5 (N_{др})^{\frac{5}{3}} \Theta^4}{V^2 R_{np}^3}; \quad (13)$$

– для определения необходимой линейной скорости движения ударного элемента при соударении:

$$V' = 21,6 \sqrt{\frac{(\sigma_{дин})^5 (N_{др})^{\frac{5}{3}} \Theta^4}{m_y R_{np}^3}}. \quad (14)$$

Использование данных зависимостей позволяет обосновать основные параметры процесса дробления материала в ударных мельницах и дробилках.

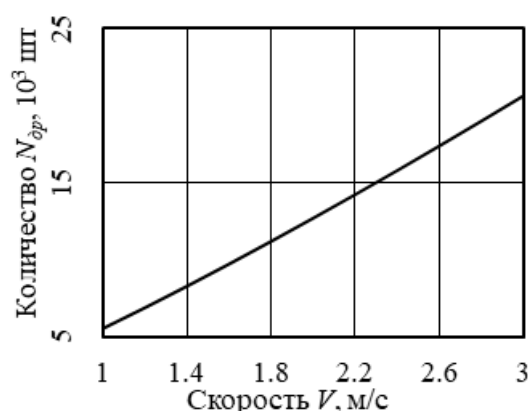


Рисунок 4 График зависимости количества дробинok, раскалываемых одиночным ударом, от скорости

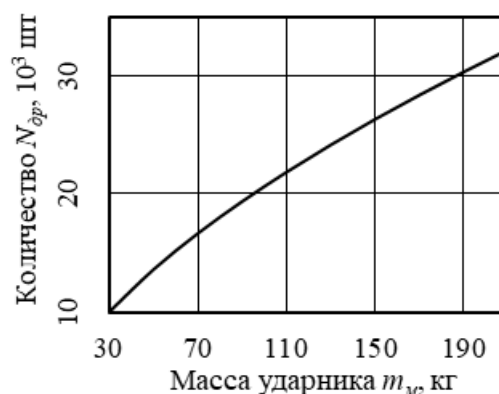


Рисунок 5 График зависимости количества дробинok, раскалываемых одиночным ударом, от массы

Выводы и направление дальнейших исследований. В ходе исследований определены зависимости количества дробинok, раскалываемых одиночным ударом, от массы ударного элемента и его скорости. Предложены аналитические формулы для обоснования массы ударного элемента и его скорости для обеспечения условий раскалывания определённого количества металлической дробин при стеснённом ударе.

Выявлено влияние данных параметров на эффективность процесса раскалывания дробин центральным упругим стеснённым ударом.

Перспективным направлением исследования процесса раскалывания дробы в роторных мельницах ударного действия является изучение процесса соударения ударного элемента с материалом с целью определения требуемых энергосиловых и технологических параметров дробильной

машины и конструкционных особенностей её рабочих органов.

В настоящее время такие работы проводятся в Донбасском государственном техническом университете с привязкой к производству стальной колотой дробы в условиях ООО «Завод стальной дробы» в г. Алчевске.

Библиографический список

1. ГОСТ 11964–81. Дробь чугунная и стальная техническая. Общие технические условия [Текст]. — Введ. 1983-01-01; измен. 1989-01-01. — М. : Изд-во стандартов, 2005. — 9 с.
2. Павлиненко, О. И. Процесс разрушения стальной дробы центральным стеснённым ударом [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов : материалы 5-й Международной научно-практической конференции. Том 3. — Донецк, 2019. — С. 104–108.
3. Павлиненко, О. И. Перспективы получения колотой стальной дробы [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко, О. А. Левченко // Новые материалы и перспективные технологии : сборник материалов Четвёртого междисциплинарного научного форума с международным участием. Т. I. — М. : ООО «Буки Веди», 2018. — С. 629–631.
4. Конструкционные материалы [Текст] : справочник / Б. Н. Арзамасов и др. — М. : Машиностроение, 1990. — 688 с.
5. Глушак, Б. Л. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках [Текст] / Б. Л. Глушак, В. Ф. Куропатенко, С. А. Новиков. — Новосибирск : Наука, 1992. — 295 с.
6. Огородников, В. А. Прочность некоторых марок стали и АРМКО-железа при ударно-волновом сжатии и разгрузке в области давлений 2–200 ГПа [Текст] / В. А. Огородников, Е. Ю. Боровкова, С. В. Ерунов // Физика горения и взрыва Т. 40. — Новосибирск : ИСО РАН, 2004. — № 5. — С. 109–117.
7. Ландау, Л. Д. Теория упругости [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. — М. : Наука, 1987. — 246 с.
8. Расчёт на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И. А. Биргер и др. — М. : Машиностроение, 1993. — 640 с.

© Павлиненко О. И.

© Власенко Д. А.

© Левченко Э. П.

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

Статья поступила в редакцию 04.09.19.

Павліненко О. І., Власенко Д. О., к.т.н. Левченко Е. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

АНАЛІТИЧНІ ПРИЙОМИ ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РОЗКОЛЮВАННЯ СТАЛЕВОГО ДРОБУ СТИСНУТИМ УДАРОМ

На підставі контактної теорії ударної взаємодії пружних тіл, запропонованої Герцем, проведено аналітичне дослідження умов руйнування кулястих тіл при ударному контакті і обґрунтовано залежності для визначення основних параметрів процесу розколювання сталевго дробу стиснутим ударом. В результаті запропоновано залежності для визначення необхідних швидкостей зіткнення, діаметрів і мас ударного елементу і дробу для забезпечення умов гарантованого руйнування матеріалу.

Ключові слова: стиснутий удар, розколювання, дріб, теорія контактної взаємодії Герца, контактні напруги, швидкість ударної взаємодії, маса ударного елементу.

Pavlinenko O. I., Vlasenko D. A., PhD in Engineering Levchenko E. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

ANALYTICAL TECHNIQUES OF SUBSTANTIATION OF THE MAIN PROCESS

VARIABLES OF STEEL SHOT CLEAVING BY CONSTRAINED STROKE

Having based on the contact theory of impact interaction of elastic bodies, proposed by Hertz, there has been carried out the analytical study of failure conditions of spherical bodies in shock contact and justified the dependence to determine main process variables of steel shot cleaving by constrained stroke. As a result, there has been find out the dependences for determining the necessary impact rate, diameters and masses of the impactor and shot to ensure the conditions of guaranteed material breakage.

Key words: *constrained stroke, cleaving, shot, Hertz theory of contact interaction, contact stress, impact rate, mass of the impactor.*

УДК 630.173.2

Афошин А. А.

(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, 80508862369@mail.ru)

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ИЗДЕЛИЙ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ ПО FDM-ТЕХНОЛОГИИ

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров при 3D-печати по FDM-технологии. Проанализировано влияние скорости на качество изделия. Установлены зависимости изменений геометрических размеров изделия от скорости печати.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, FDM-технология, параметры режима печати, качество послойной модели.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. На современном этапе развития аддитивных технологий (АТ) применяют разнообразные принтеры для 3D-печати. В зависимости от себестоимости и требуемого качества поверхности, а также размерной точности получаемого изделия применяют различные АТ, такие как: SLA, SLS, LOM, DMD, DLP, Ink-Jet, Poly-Jet, FDM и т. д. Данные технологии находят применение в различных сферах промышленности: медицине, строительстве, авиастроении, электронике, машиностроении и т. д. [1].

С точки зрения простоты использования оборудования и доступности материалов FDM-технологии являются наиболее массовыми, при этом их основное применение ограничивается сферой образования, «домашнего» моделирования и развлечения [2].

Исходя из этого, преимущества FDM-технологии целесообразно использовать в отраслях машиностроения, связанных с заготовительным производством [3], где отсутствуют повышенные требования к качеству поверхности, прочности, чистоте поверхности и будут обеспечены необходимые требования к изделию при низкой себестоимости.

Постановка задачи. На данный момент в научной и технической литературе нет достаточно обоснованных рекомендаций по технологическим параметрам для режимов печати по FDM-технологии. В связи с этим возникает актуальная потребность в опре-

делении оптимальных технологических параметров для получения изделий по FDM-технологии с характеристиками, обеспечивающими требуемое качество.

Изложение материала и его результаты. Под требуемым качеством изделия понимаем соблюдение размеров, чистоту поверхности и отсутствие на ней дефектов в тех пределах, которые заданы на чертеже, в технических условиях [4].

В зависимости от объективно существующих условий на производстве и конструктивно-технологических особенностей самого изделия цена достижения требований по его размерной точности может существенно различаться. В любом случае чем требования выше, т. е. допуск меньше, тем реализованная себестоимость изделия выше, и эта зависимость имеет гиперболический характер. Считается (в среднем), что «рациональная стоимость» технологического допуска достигается при условии, что он составляет порядка $0,3 \div 0,4$ % от величины номинального размера [5].

На качество печатаемого изделия оказывает влияние множество факторов, среди которых выделим наиболее критичные и сведём результаты в таблицу 1. Среди этих факторов наибольшее воздействие пользователь может оказывать на точность работы механизмов 3D-принтера и точность настроек для 3D-печати.

Наряду с критичными факторами существует совокупность «условно» контролируемых факторов, таких как: механическая

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

исправность всех механизмов и элементов принтера, устойчивость стола, на котором располагается модель, выставленная величина зазора между соплом и столом, достаточный обдув модели и т. д. При проведении испытаний данные факторы условно пропускаем.

Таблица 1

Критичные факторы для качества печати по FDM-технологии

№	Фактор	Регламентирующий параметр
1	Качество используемого сырья	Свойства сырья регламентируются по ТУ от поставщика (критичный — усадка: при изготовлении изделий 0,4–0,7 %).
2	Точность работы механизмов 3D-принтера	Задаёт производитель, достигается доработкой, а также регулярной ревизией оборудования
3	Точность настроек для 3D-печати	Задаёт пользователь вручную

Современные 3D-принтеры для общего использования могут изменять скорость печати в широком диапазоне, общеизвестными считаются три условных диапазона настроек скорости: от 30 до 50 мм/с, от 80 до 100 мм/с, от 150 мм/с и более.

3D-печать производилась на 3D-принтере TEVO Tarantula i3 с использованием мононити из пластика ABS+ производителя «Стримпласт», поставляемой по ТУ 2291–001–24687042–2016.

Обработка модели для подготовки к печати проводилась в программе Simplify 3D. Для увеличения адгезии материала со столом перед печатью он покрывался связующим клеем на PVP основе. Согласно [6] было напечатано по пять образцов модели «втулка» (см. рис. 1, б) для каждого значения скорости. Печать осуществлялась по следующему режиму: толщину укладываемого слоя нити принимали $h_{сл} = 100$ мкм, скорость движения сопла экструдера (V_c) изменяли от 10 до 150 мм/с, температура окружающей среды комнатная. Параметры режима печати представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные контролируемые параметры режима печати по FDM-технологии

№	Объект контроля	Наименование параметра	Применяемое значение параметра	Ед. изм.
1	2	3	4	5
1	Материал	Сырьё	полиамид белый	-
2		Диаметр нити	1,75	мм
3	Принтер	Диаметр сопла	0,2	мм
4	Слайсер	Время печати	от 117 до 1410	мин
5		Скорость заполнения модели	от 10 до 150	мм /с
6		Плотность заполнения модели	100	%
7		Толщина стенок	0,1	мм
8		Количество слоёв	от 183224 до 183716	шт.
9		Температура печати: – сопла – стола	240 80	°C
10		Общий вес	3,77	г
11		Расход нити	1252,6	мм

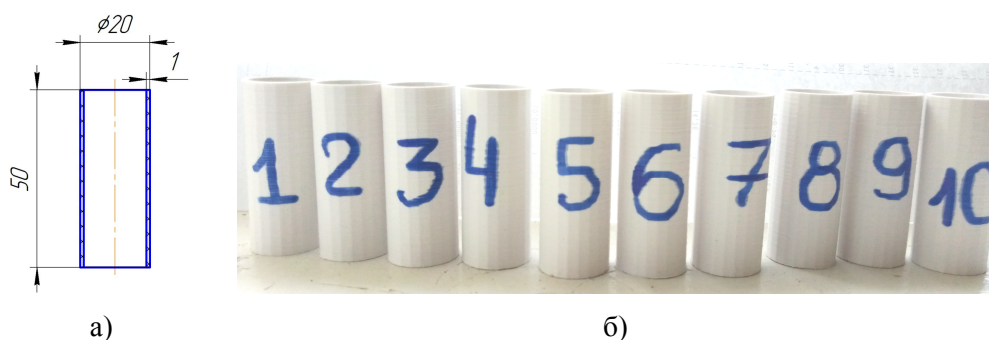


Рисунок 1 Модель «втулка»: а) эскиз модели; б) фото испытуемых образцов

Исследуемая модель представляет собой тонкостенный цилиндр (см. рис. 1, а) со следующими размерами: наружный диаметр (D_n) 20 мм, внутренний ($D_{вн}$) — 18 мм, толщина стенки ($\delta_{ср}$) 1 мм, длина изделия (l) 50 мм. Заданные линейные и радиальные размеры полученных образцов подвергались замерам и контролю качества, которое оценивалось визуально на гладкость полученной внешней поверхности.

Линейные размеры замерялись штангенциркулем ШЦЦ-I-125-0,01 ГОСТ 166-89, а радиальные — микрометром МК25-I ГОСТ 6507-90.

Замеры проводили согласно [7]. На основании замеров всех образцов были выбраны средние значения размеров, результаты приведены в таблице 3.

Для обработки результатов эксперимента использовали статистический метод средних величин, таким образом были определены

зависимости изменений скорости печати от размеров изделия: длины, наружного и внутреннего диаметров, толщины стенки.

На рисунке 2 представлен график зависимости изменений размеров длины цилиндра от скорости печати.

Таблица 3
Результаты замеров образцов

Скорость печати	l	D_n	$D_{вн}$	$\delta_{ср}$
мм/с	мм			
1	2	3	4	5
10	49,82	19,85	17,41	1,40
30	49,75	19,94	17,35	1,43
50	49,79	19,86	17,35	1,43
70	49,79	19,79	17,42	1,40
90	49,84	19,85	17,41	1,42
110	49,74	19,80	17,42	1,42
130	49,78	19,84	17,36	1,41
150	49,75	19,82	17,41	1,40

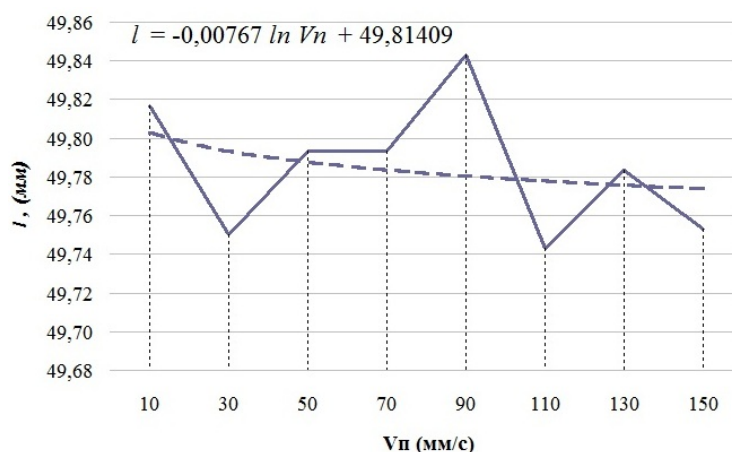


Рисунок 2 График зависимости изменений размеров длины цилиндра от скорости печати

В диапазоне скоростей 10–70 мм/с наблюдаются наибольшие значения погрешности длин цилиндра. В интервале скоростей 70–100 мм/с значения погрешности длин практически подчинены линейному закону. В интервале скоростей 100–150 мм/с получены наименьшие погрешности длины цилиндра.

На рисунке 3 представлен график зависимости размеров наружного диаметра цилиндра от скорости печати.

Полученные эмпирические значения внешних диаметров в диапазоне скоростей от 75 мм/с до 150 мм/с незначительно отличаются относительно измерений значений. Об этом свидетельствуют значения относи-

тельных погрешностей, полученных при сравнении измеренных и эмпирических значений. Наиболее оптимальным значением наружного диаметра является $D_H = 19,83$ мм.

На рисунке 4, продемонстрирован график зависимости размеров внутреннего диаметра цилиндра от скорости печати.

Эмпирическая функциональная зависимость внутреннего диаметра цилиндра от скорости печати является возрастающей. Наиболее удовлетворительные результаты получены на интервале 70–90 мм/с, оптимальное значение $D_{вн.} = 17,395$ мм.

На рисунке 5 продемонстрирован график зависимости изменений размеров толщины стенки цилиндра от скорости печати.

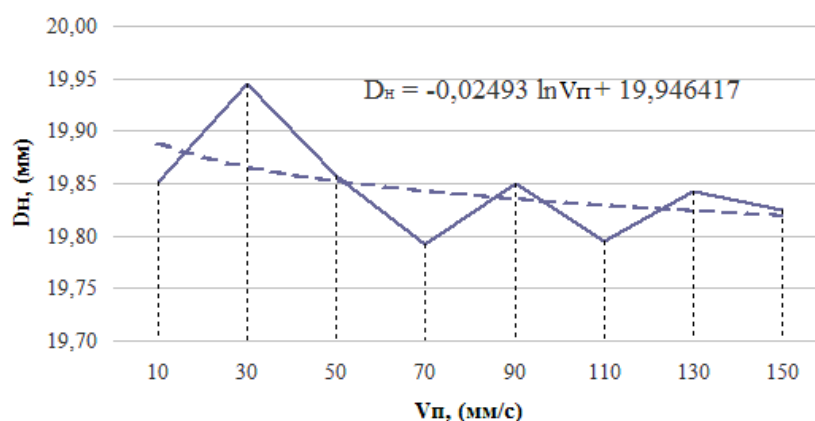


Рисунок 3 График зависимости изменений размеров наружного диаметра цилиндра от скорости печати

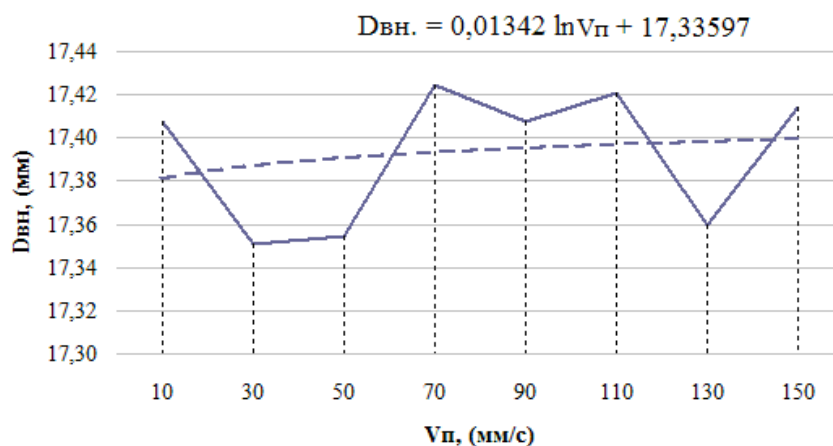


Рисунок 4 График зависимости изменений размеров внутреннего диаметра цилиндра от скорости печати

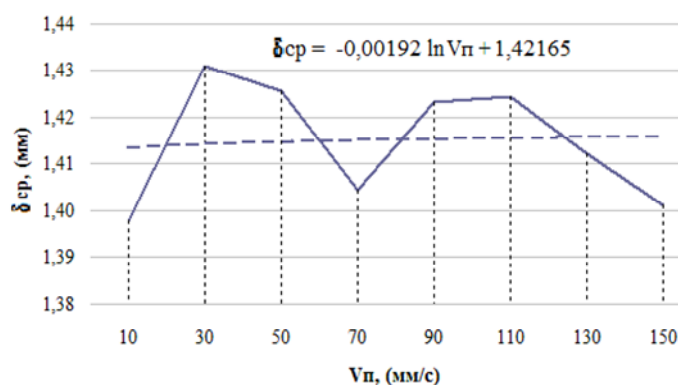


Рисунок 5 График зависимости изменений размеров толщины стенки цилиндра от скорости печати

По полученному графику видно, что наиболее удовлетворительные значения толщины стенки получены в интервале 75–150 мм/с, кривая практически вырождается в прямую, оптимальное значение $\delta_{\text{ср}} = 1,412$ мм.

Выводы и направление дальнейших исследований. Определены критичные факторы для качества печати изделия по FDM-технологии, а также ключевые параметры, при управлении которыми можно изменять производительность процесса.

Установлено, что скорость заполнения модели является одним из важных параметров режима печати. В зависимости от требований к получаемой детали необхо-

димо регулировать скорость заполнения модели и тем самым влиять на время технологического процесса.

Определена оптимальная скорость печати, которая составляет 70 мм/с.

Проведены замеры габаритных размеров изделия, напечатанного по FDM-технологии, на основании которых эмпирически определен предел между достаточной скоростью и геометрической точностью размеров.

Установлено, что наиболее существенной зависимостью при замерах являются размеры наружного диаметра изделия.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 57558-2-017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы [Текст]. — Введ. 2017-12-01. — М. : Стандартинформ, 2018. — 10 с.
2. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] : пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. — М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. — 220 с.
3. Корбанов, В. Д. Изготовление модельной оснастки в литейном производстве с применением аддитивных технологий [Текст] / В. Д. Корбанов, А. И. Вальтер // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2018. — Вып. 10. — С. 334–338.
4. Невлюдов, И. Ш. Разработка комплексного метода оценки качества пластмассовых деталей [Текст] / И. Ш. Невлюдов, С. В. Сотник, А. В. Фролов, Н. П. Демская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2017. — Вып. 1. — С. 29–38.
5. Брагинский, В. А. Назначение и выбор технологических допусков изделий из пластмасс [Текст] / В. А. Брагинский // Полимерные материалы. — 2004. — Вып. 9. — С. 12–14.
6. ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) Пластмассы. Метод испытания на сжатие [Текст]. — Введ. 2015-03-01. — М. : Стандартинформ, 2014. — 18 с.
7. ГОСТ 33694-2015 Пластмассы. Определение линейных размеров образцов для испытания [Текст]. — Введ. 2017-01-01. — М. : Стандартинформ, 2016. — 5 с.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ТМиИК ЛНУ им. В. Даля Витренко В. А.,
к.т.н., доц. каф. АЭС им. Зеленова А.Б. ДонГТУ Карпук И. А.*

Статья поступила в редакцию 25.08.19.

Афошин А. О. (ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР, 80508862369@mail.ru)

**ВПЛИВ ШВИДКОСТІ НА ГЕОМЕТРИЧНІ РОЗМІРИ ВИРОБІВ ПРИ 3D-ДРУЦІ
ЗА FDM-ТЕХНОЛОГІЄЮ**

Наведено результати експериментальних досліджень параметрів при 3D-друці за FDM-технологією. Проаналізовано вплив швидкості на якість виробу. Встановлено залежності змін геометричних розмірів виробу від швидкості друку.

Ключові слова: адитивні технології, 3D-друк, FDM-технологія, параметри режиму друку, якість пошарової моделі.

Afoshin A. A. (LNU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, 80508862369@mail.ru)

**RATE INFLUENCE ON GEOMETRIC DIMENSIONS OF PRODUCT AT 3D-PRINTING ON
FDM-TECHNOLOGY**

The results of experimental research of parameters at 3D-printing on FDM-technology are presented. The influence of speed on the product quality is analyzed. The dependencies of changes in the geometric parameters of product on the print speed are determined.

Key words: additive technologies, 3D-printing, FDM-technology, print mode parameters, quality of layered model.

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

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 7 раз за 2 года. Сборник формирует информационный отдел: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, ДонГТУ; тел./факс: (06442) 2-68-87, e-mail: info@dstu.education (тема: для редакции сборника научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ»); 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 (на усмотрение автора, рекомендовано два вида рецензий: рецензия в произвольном изложении; международная форма рецензирования статьи);

– 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, украинский.

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».

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 публикации: 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.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, полное название организации, название статьи, аннотации и ключевые слова на оставшемся языке из двух (русский, украинский), 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.

Оформление аннотаций отдельным файлом

Аннотация и ключевые слова дополнительно подаются на двух языках (русский, украинский) 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 двух языках (русский, украинский) 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.» (на русском языке), «Мета.», «Методика.», «Результати.», «Наукова новизна.», «Практична значущість.» (на украинском языке), «Aim.», «Technique.», «Results.», «Scientific novelty.», «Practical significance.» (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 вверх или вниз). 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 11 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. Статья не должна заканчиваться рисунком. Рекомендуются, 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** 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.

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***Литвинский Г. Г.*

ГОРНАЯ КРЕПЬ: ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ И КРИТЕРИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ	5
--	---

Ларченко В. Г., Коваленко Е. В., Маталкина Ю. А.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ОЖИДАЕМЫХ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ	20
--	----

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ*Снитко С. А., Руденко Е. А., Пилипенко В. В.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА РЕДУЦИРОВАНИЯ СЛЯБА ПО ШИРИНЕ В УСТАНОВКЕ ТИПА «ТРИПЛЕТ»	29
---	----

Жижкина Н. А.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАССИВНЫХ ВАЛКОВ	36
---	----

Мороз В. В., Рубежанский В. И., Левченко Э. П.

К ВОПРОСУ МНОГОСТАДИЙНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА В ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ	43
---	----

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА*Бондарчук В. В., Глушкина И. К.*

АКТУАЛЬНОСТЬ РЕНОВАЦИИ НЕДЕЙСТВУЮЩИХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ НА ПРИМЕРЕ ДОНБАССКОГО РЕГИОНА	51
---	----

Емец Е. В., Никишина И. А., Коняшкина О. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОГО МАССИВА, РАСПОЛОЖЕННОГО ВБЛИЗИ ОТКОСОВ	61
---	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ*Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П.*

ОБОСНОВАНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ УТОЧНЁННОГО ТЯГОВОГО РАСЧЁТА	71
---	----

Ульяницкий В. Н., Петров П. А., Ульяницкая О. В., Билан Г. А.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НОЖНИЦ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА	78
--	----

Вишневский Д. А.

ВЛИЯНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА НАДЁЖНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО И МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	87
--	----

Карпук И. А., Юрьев С. А.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СВЧ-ПЛАЗМОТРОНА	94
---	----

Спорняк В. Г., Левченко Э. П., Левченко О. А., Карпук И. А.

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЖУЩЕ-УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ	99
--	----

Павлиненко О. И., Власенко Д. А., Левченко Э. П.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРИЁМЫ ОБОСНОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАСКАЛЫВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ СТЕСНЁННЫМ УДАРОМ	106
---	-----

Афошин А. А.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ИЗДЕЛИЙ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ
ПО FDM-ТЕХНОЛОГИИ 113

ЗМІСТ

НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

Литвинський Г. Г.

ГІРСЬКЕ КРІПЛЕННЯ: ЕВОЛЮЦІЯ РОЗВИТКУ І КРИТЕРІЇ ТЕХНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ...5

*Ларченко В. Г., Коваленко О. В., Маталкіна Ю. А.*УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ОЧІКУВАНИХ ЗРУШЕНЬ
І ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ВИДОБУТКУ ВУГІЛЛЯ20

МЕТАЛУРГІЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

*Снітко С. О., Руденко Є. О., Пилипенко В. В.*ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ РЕДУКУВАННЯ СЛЯБА
ПО ШИРИНІ В УСТАНОВЦІ ТИПУ «ТРИПЛЕТ»29*Жижкіна Н. О.*

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ МАСИВНИХ ВАЛКІВ36

*Мороз В. В., Рубежанський В. І., Левченко Е. П.*ДО ПИТАННЯ БАГАТОСТАДІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛУ В ОДНОВАЛКОВІЙ
ЗУБЧАСТІЙ ДРОБАРЦІ43

БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА

*Бондарчук В. В., Глушкіна І. К.*АКТУАЛЬНІСТЬ РЕНОВАЦІЇ НЕДІЮЧИХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ НА ПРИКЛАДІ
ДОНБАСЬКОГО РЕГІОНУ51*Смець О. В., Нікішина І. О., Коняшкіна О. А.*ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ҐРУНТОВОГО МАСИВУ, РОЗТАШОВАНОГО ПОБЛИЗУ
УКОСІВ61

МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАШИНОЗНАВСТВО

*Корнєєв С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П.*ОБҐРУНТУВАННЯ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ШАХТНИХ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СПЕЦІАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ УТОЧНЕНОГО ТЯГОВОГО
РОЗРАХУНКУ71*Ульяницький В. Н., Петров П. О., Ульяницька О. В., Білан Г. О.*АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ
РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ НОЖИЦЬ ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА78*Вишневський Д. О.*ВПЛИВ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА НА НАДІЙНІСТЬ МЕТАЛУРГІЙНОГО
І МАШИНОБУДІВНОГО ОБЛАДНАННЯ87*Карпук І. А., Юр'єв С. О.*ЗАСТОСУВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ТЕЧІЇ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ
НВЧ-ПЛАЗМОТРОНА94*Спорняк В. Г., Левченко Е. П., Левченко О. О., Карпук І. А.*ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЕРТИКАЛЬНОГО РІЗУЧО-УДАРНОГО
ПОДРІБНЮВАЧА99*Павліненко О. І., Власенко Д. О., Левченко Е. П.*АНАЛІТИЧНІ ПРИЙОМИ ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ
РОЗКОЛЮВАННЯ СТАЛЕВОГО ДРОБУ СТИСНУТИМ УДАРОМ106*Афошин А. О.*ВПЛИВ ШВИДКОСТІ НА ГЕОМЕТРИЧНІ РОЗМІРИ ВИРОБІВ ПРИ 3D-ДРУЦІ
ЗА FDM-ТЕХНОЛОГІЄЮ113

CONTENT**GEOSCIENCES**

<i>Litvinsky G. G.</i> MINE SUPPORT: EVOLUTION OF DEVELOPMENT AND CRITERIA OF TECHNICAL EFFICIENCY	5
<i>Larchenko V. G., Kovalenko E. V., Matalkina Yu. A.</i> IMPROVEMENT OF DESIGN PROCEDURE OF THE EXPECTED SHIFTS AND EARTH CRUST DEFORMATIONS DURING COAL MINING	20

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES

<i>Snitko S. A., Rudenko E. A., Pilipenko V. V.</i> STUDYING THE TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF THE SLAB WIDTH REDUCTION PROCESS IN THE “TRIPLET” TYPE UNIT	29
<i>Zhyzhkina N. A.</i> IMPROVEMENT OF HEAT TREATMENT TECHNOLOGY OF MASSIVE ROLLS	36
<i>Moroz V. V., Rubezhanskiy V. I., Levchenko E. P.</i> THE QUESTION OF MULTISTAGE MATERIAL PROCESSING IN A SINGLE ROLL CRUSHER	43

CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

<i>Bondarchuk V. V., Glushkina I. K.</i> RELEVANCE OF RENOVATION OF NON-OPERATING COAL MINES ON THE EXAMPLE OF THE DONBASS REGION	51
<i>Emets E. V., Nikishina I. A., Koniashkina O. A.</i> INVESTIGATION OF SOIL MASS STABILITY NEARBY SLOPES	61

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Korneev S. V., Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P.</i> JUSTIFICATION OF THE RATE MODE OF MINE BELT CONVEYORS USING A SPECIAL TECHNIQUE OF REFINED TRACTION CALCULATION	71
<i>Ul'yanitskiy V. N., Petrov P. A., Ul'yanitskaia O. V., Bilan G. A.</i> ANALYZING THE EFFICIENCY OF METHODS TO ENHANCE THE RESISTANCE AND DURABILITY OF THE ROLLING SHEAR CUTTING TOOL	78
<i>Vishnevskiy D. A.</i> INFLUENCE OF HUMAN FACTOR” ON RELIABILITY OF THE METALLURGICAL AND MECHANICAL-ENGINEERING EQUIPMENT	87
<i>Karpuk I. A., Yuryev S. A.</i> USING OF RADIAL AIRFLOW FOR MICROWAVE PLASMA TORCH COOLING	94
<i>Sporniak V. G., Levchenko E. P., Levchenko O. A., Karpuk I. A.</i> SUBSTANTIATION OF THE MAIN PARAMETERS OF THE VERTICAL CUTTING AND IMPACT CRUSHER	99
<i>Pavlinenko O. I., Vlasenko D. A., Levchenko E. P.</i> ANALYTICAL TECHNIQUES OF SUBSTANTIATION OF THE MAIN PROCESS VARIABLES OF STEEL SHOT CLEAVING BY CONSTRAINED STROKE	106
<i>Afoshin A. A.</i> RATE INFLUENCE ON GEOMETRIC DIMENSIONS OF PRODUCT AT 3D-PRINTING ON FDM-TECHNOLOGY	113

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

**Збірник наукових праць
Донбаського державного
технічного університету**

Збірник

Випуск 15 (58) 2019

Засновник:
**Донбаський державний технічний
університет**

*Свідоцтво Міністерства інформації,
друку і масових комунікацій ЛНУ
про державну реєстрацію засобу масової
інформації МІ-СГР ПП 000003
від 05.02.2016*

*Наказом Міністерства освіти і науки Донецької
Народної Республіки від 2 травня 2017 р. № 464
збірник наукових праць включений до Переліку
рецензованих наукових видань, в яких повинні
бути опубліковані основні наукові результати
дисертацій на здобуття наукового ступеня
кандидата наук, на здобуття наукового ступеня
доктора наук, затвердженого наказом
Міністерства освіти і науки Донецької Народної
Республіки від 1 листопада 2016 р. № 1134, згідно
з додатком 1*

*Наказом МОН ЛНУ № 911-ОД від 10.10.2018
збірник наукових праць ДонДУ внесений до
Переліку рецензованих наукових видань, в яких
повинні бути опубліковані основні наукові
результати дисертацій на здобуття наукового
ступеня кандидата наук, на здобуття наукового
ступеня доктора наук, затверджений наказом
Міністерства освіти і науки Луганської Народної
Республіки від 15 травня 2018 р. № 477-ОД*

*Рекомендовано вченою радою
ДООЗ ВПО ЛНУ «ДонДУ»
(Протокол № 3 від 25.10.2019)*

Включений до наукометричної бази даних РІНЦ

Формат 60×84¹/₈
Ум. друк. арк. 16
Зам. № 274

Наклад 100 пр.

Видавництво не несе відповідальності за зміст
матеріалу, наданого автором до друку

Адреса редакції, видавця
та виготовлювача:

ДООЗ ВПО ЛНУ
«Донбаський державний технічний університет»
пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, ЛНУ, 94204.

E-mail: info@dstu.edu

Web-site: <http://www.dstu.edu>

ВИДАВНИЧО-ПОЛІГРАФІЧНИЙ ЦЕНТР,
ауд. 2113, т./факс 2-58-59

Свідоцтво про державну реєстрацію видавця,
виготовлювача

і розповсюджувача засобу масової інформації
МІ-СГР ВД 000055 від 05.02.2016

Головний редактор

Зінченко А. М. — к.е.н., ректор

Заступник головного редактора

Куберський С. В. — к.т.н., проф.

Редакційна колегія:

Литвинський Г. Г. — д.т.н., проф.

Фінкельштейн З. Л. — д.т.н., проф.

Корнєєв С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. О. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Ульяницький В. Н. — к.т.н., проф.

Зелінський А. М. — к.т.н., проф.

Должиков В. В. — к.т.н., доц.

Денищенко П. М. — к.т.н., доц.

Дрозд Г. Я. — д.т.н., проф.

Шолух М. В. — д. арх., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомська С. А. — секретар редакційної колегії

Для наукових співробітників, аспірантів,
студентів вищих навчальних закладів.

Мова видання:

російська, українська та англійська

Комп'ютерна верстка і коректура

Ісмаїлова Л. М.

© ДООЗ ВПО ЛНУ «ДонДУ», 2019

© Чернишова Н. В., художнє
оформлення обкладинки, 2019

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

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

Collection

Issue 15 (58) 2019

**Establisher:
Donbass State Technical University**

*Certificate of the Ministry of Information,
Press and Mass Communication of the LPR
for mass media registration
MI-SGR PI 000003
dated 05.02.2016*

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

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

*Recommended by academic council
of SEI HPE "DonSTU"
(Record № 3 dated 25.10.2019)*

Added to scientometrical database of RSCI

Format 60×84½
Conventional printed sheet 16
Order № 274

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

Address of editorial office, publishing and
establishing: Donbass State Technical University
Lenin avenue, 16, Alchevsk, LPR
94204

e-mail: info@dstu.education
web-site: <http://www.dstu.education>

**PUBLISHING AND PRINTING
CENTER**

room 2113, tel/fax 2-58-59
Certificate of State registration for mass media
publisher, owner and distributor
MI-SGR ID 0000055 dated 05.02.2016

Editor-in-chief

Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Rector

Deputy Editor-in-chief

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

Editorial board:

Litvinskiy G. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Finkelstein Z. L. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Korneev S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Leonov A. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.

Kharlamov Yu. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Ul'ianitskiy V. N. — PhD in Engineering, Prof.

Zelinskiy A. N. — PhD in Engineering, Prof.

Dolzhikov V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.

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

Drozd G. Ya. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Sholukh N. V. — Doctor of Arch., 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, Ukrainian, English

Computer layout and proofreading

Ismailova L. M.

© SEI HPE "DonSTU", 2019

© Chernyshova N. V., graphic cover
design, 2019