

ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

Выпуск 27 (70) 2022



СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник
научных трудов
Донбасского государственного технического
института**

Сборник
Выходит 4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 27 (70) 2022

Collection of Scientific Papers of DonSTI

Collection
Publishing 4 times a year
Founded in June 1999
Issue 27 (70) 2022

Алчевск
2022

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

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

**Сборник научных трудов
Донбасского государственного
технического института**

Сборник

Выпуск 27 (70) 2022

**Основатель:
ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»**

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

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

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

*Рекомендовано учёным советом
ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»
(Протокол № 10 от 29.06.2022)*

Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84½
Усл. печат. л. 13,75
Заказ № 153
Тираж 100 экз.

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

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

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

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

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.

Борщевский С. В. — д.т.н., проф.

Корнеев С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. А. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Артюх В. Г. — д.т.н., проф.

Зинченко А. М. — к.э.н., доц.

Снитко С. А. — д.т.н., проф.

Куберский С. В. — к.т.н., проф.

Должиков В. В. — к.т.н., доц.

Денищенко П. Н. — к.т.н., доц.

Шолух Н. В. — д. арх., проф.

Андрійчук Н. Д. — д.т.н., проф.

Пилавов М. В. — д.т.н., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной
коллекции

Для научных сотрудников, аспирантов,
студентов высших учебных заведений.

Язык издания:
русский, английский

Компьютерная вёрстка
Исмаилова Л. М.

© ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022

© Чернышова Н. В., художественное
оформление обложки, 2022

НАУКИ О ЗЕМЈЕ

GEOSCIENCES

УДК 622.243.2:622.831.2.02

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

ФРАГМЕНТАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ТЕЛЕ С МИКРОДЕФЕКТАМИ

Стремление повысить достоверность описания поведения материалов при термомеханических воздействиях требует перехода к все более сложным математическим моделям. В данной работе представлена новая модель напряженно-деформированного состояния (НДС) твердого тела с микродефектами при произвольном его нагружении. На основе качественного анализа закономерностей распределения микродефектов сдвигового и разрывного типа оценены аномалии напряжений в их окрестности. Выбраны и обоснованы параметры математической модели НДС, основные предпосылки и ограничения. Рассмотрено и оценено влияние прочностных показателей на микросдвиги и разрывы. Доказана фрагментация напряжений по всему объему тела, вызванная микродефектами. Впервые получена система уравнений НДС, показаны микромеханизмы формирования петель гистерезиса при знакопеременном нагружении тела, оценено различие напряжений на упругих и дефектных площадках тела.

Ключевые слова: микросдвиг, микроразрыв, теория НДС, математическая модель, упругие и дефектные области, фрагментация напряжений, параметры прочности, петли гистерезиса.

1 Актуальность и цель исследований

Многочисленные исследования, которые проводятся в настоящее время, направлены на изучение особенностей поведения материалов со сложной (гетерогенной) структурой под влиянием разнообразных температурно-механических воздействий и привлекают внимание многих ученых в области твердого деформируемого тела и материалов естественного и искусственного генезиса [1–6 и др.]. Делать подробный анализ ранее выполненных исследований по данной проблематике нет необходимости ввиду уже существующих достаточно обстоятельных обзоров и оценок [7–9 и др.]. До сих пор остается справедливым утверждение [3], что теория механического поведения материалов еще далека от своего завершения. Очевидно, приходится иметь дело с явлениями на самых различных уровнях; там, где нет точных решений, приходится пользоваться приближенными моделями, а там, где нет моделей или они сложны, придется обращаться к экспериментальным данным и эмпирическим описаниям.

Одной из главных задач этой сложной проблемы по праву можно считать уста-

новление всей картины напряженно-деформированного состояния (НДС) в сложно-структурированном материале с микро- и мезодефектами, возникшими в результате термофлуктуационных процессов под действием внешних температурно-силовых воздействий.

Задача изучения НДС микродефектного тела должна базироваться на четком и непротиворечивом описании всего разнообразия микродефектов (поврежденностей) с учетом их расположения и взаимодействия друг с другом. Попытки аналитического решения такой краевой задачи в прямой постановке с использованием математической теории упругости, пластичности и ползучести ввиду чрезвычайной сложности можно заранее считать обреченными на неудачу.

Поэтому на пути решения этой проблемы неизбежно возникает необходимость принятия некоторого числа аксиом и упрощающих предпосылок. Последние должны тем не менее опираться на ранее проведенные наблюдения, экспериментальные данные и ранее установленные теоретические соотношения. К числу таких исходных предпосылок, положенных нами в основу изучения НДС микродефектного тела, следует отнести:

– в теле представлены микродефекты в виде микросдвигов, микроразрывов и их ансамблей [10];

– микродефекты в твердом теле расположены стохастически равномерно, при этом тело в целом квазиизотропно;

– задана фиксированная на данный промежуток времени исходная структура микродефектов в виде матрицы W_{ij} [6], т. е. рассматривается квазистатическая задача;

– главный вектор и главный момент от внешней нагрузки равны нулю, т. е. рассматривается статическое равновесие.

Эти и принятые далее условия являются достаточно гибкими и не приводят к существенному ограничению общности решаемой задачи.

Цель исследования — разработка теории НДС микродефектного тела при произвольном внешнем его нагружении.

Идея работы состоит в использовании ранее предложенной математической модели микродефектного тела, в котором существует структура из поврежденностей сдвигового и разрывного типов.

Объектом исследований являются структура микродефектов в виде сдвигов и разрывов и ее влияние на НДС, **предмет** исследований — закономерности НДС в теле с микродефектами.

К основным **задачам** исследования следует отнести:

– оценку местных (локальных) возмущений НДС, возникающих в окрестности разрывных и сдвиговых микродефектов;

– выбор и обоснование параметров математической модели НДС, основных предпосылок и ограничений;

– разработку и обоснование метода определения НДС на сдвиговых и разрывных областях твердого тела;

– исследование закономерности НДС микродефектного тела.

Выполненные исследования являются продолжением и существенным образом опираются на результаты работы [10], где представлена новая теория микро- и мезодефектов в твердом теле.

2 Элементарные микродефекты при определении НДС

Под воздействием внешних сил, приложенных к телу с макро-, мезо- и микродефектами, возникает напряженное состояние, определение которого представляет собой весьма сложную задачу механики твердого деформированного тела.

Априори можно утверждать, что следует различать макро- и микроуровни напряженного состояния материала. Под макронапряженным состоянием понимают такое распределение напряжений и деформаций, которое игнорирует неоднородности путем как бы размазывания влияния микродефектов в теле, т. е. допускают осреднение их влияния по всему объему. Это позволяет рассматривать тело как квазиоднородное, пренебрегая наличием мезо- и микроповрежденностей.

В противовес этому микро- и мезонапряженное состояние тела предполагает более детальное описание распределения напряжений с учетом влияния микродефектов. При этом при переходе к макромасштабу эти микронапряжения, после осреднения по объему, должны в пределе быть равными макронапряжениям. Разумеется, решение такой задачи о НДС материала с учетом неоднородностей и поврежденностей заметно усложняется и может быть выполнено с разной степенью детализации.

Рассмотрим элементарный объем микродефектного тела, в котором существуют оба типа дефектов, — микроразрывов и микросдвигов [10], определенным образом ориентированных приложенной нагрузкой, в виде Z -ансамблей, стохастически равномерно распределенных по всему объему материала.

Стремление описать НДС вокруг трещин «в лоб» с учетом всех его особенностей, в том числе и в краевых областях дефектов, где расположены сингулярности, как это делается, например, в механике разрушения [3, 6 и др.], в данном случае малопродуктивно и заранее обречено на неудачу.

Все многообразие поврежденностей, которые возникают в материале, можно в

конечном итоге представить той или иной комбинацией элементарных разрывных и сдвиговых деформаций.

Как известно, в теле возможны три типа элементарных нарушения сплошности (краевых деформаций): *I* — нормальный отрыв; *II* — продольный и *III* — поперечный сдвиги (рис. 1).

Такого типа элементарные микродефекты оказываются достаточными, чтобы по отдельности или в совокупности в разных сочетаниях описать любое структурное изменение твердого тела. Однако при попытках точного аналитического определения НДС в окрестности таких дефектов возникают значительные математические осложнения (например, сингулярности и пр.), которые многократно увеличиваются, когда такие микродефекты взаимодействуют друг с другом.

3 Ансамбли микродефектов при определении НДС

Среди многочисленных исследований в области механики разрушения внимание почти всех авторов было сосредоточено на изучении напряженно-деформированного состояния материала в окрестности трещин *I* типа — нормального разрыва. На рисунке 2 показана качественная картина распределения концентрации касательных напряжений вокруг кончика такого типа трещин. Несмотря на сравнительную простоту исходного объекта исследования — трещины разрыва, в краевой части которой одинаковый тип деформаций (*I* — нормальный отрыв), — распределение напряжений отличается чрезвычайной сложностью.

Особое внимание следует обратить на высокую концентрацию напряжений (сингулярность) возле кончика трещин. Это создает возможность дальнейшего роста трещины по двум механизмам: либо путем продолжения нормального отрыва *I*, приводящего к удлинению трещины, либо в виде появления в кончике трещины сдвигов под углом, близким к 45° (рис. 3), что превращает трещину в *Z*-ансамбль дефектов [10].

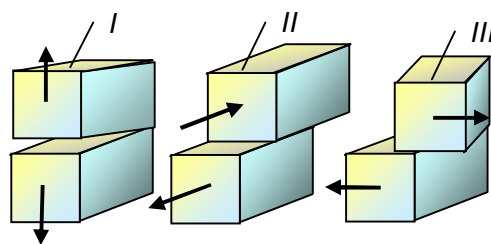


Рисунок 1 Элементарные микродефекты с разрывом сплошности: *I* — нормальный отрыв, *II* — продольный сдвиг, *III* — поперечный сдвиг

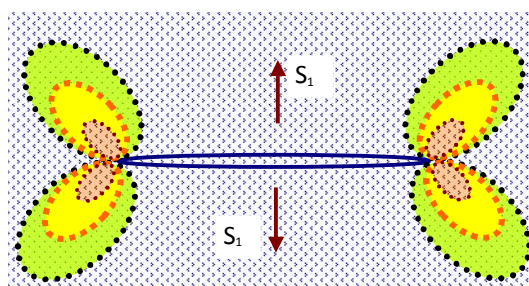


Рисунок 2 Качественная картина напряженно-деформированного состояния в окрестности элементарного разрыва

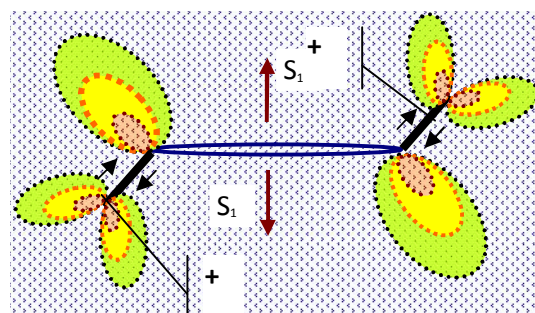


Рисунок 3 Схема распределения напряжений вокруг ансамбля дефектов «разрыв + сдвиги» при растяжении

В окрестности *Z*-ансамбля дефектов присутствуют все три возможных типа деформации. Надо отметить, что коэффициенты интенсивности напряжений для каждого типа деформаций изучены в рамках линейной механики разрушения [6] и трактуются как функции приложенных нагрузок, геометрии тела и трещины.

Однако для микронеоднородного тела [8] с целью определения трещиностойкости

конструкции (т. е. сопротивления конструкции распространению трещин) оказалось необходимым производить свертку этих коэффициентов, добиваясь получения обобщенных критериальных соотношений, которые неоднократно предлагались многими исследователями.

В работе [6] таких критериев разрушения приведено более двадцати, что свидетельствует об отсутствии единой трактовки разрушения и далеко от завершения методическом подходе к решению этой сложной проблемы.

Из области изучения проблем и решения задач механики разрушения выпали многие вопросы образования и развития произвольно ориентированных дефектов сдвигового характера и ансамблей дефектов *Z*-типа и тем более задачи определения напряжений в их окрестности (рис. 4).

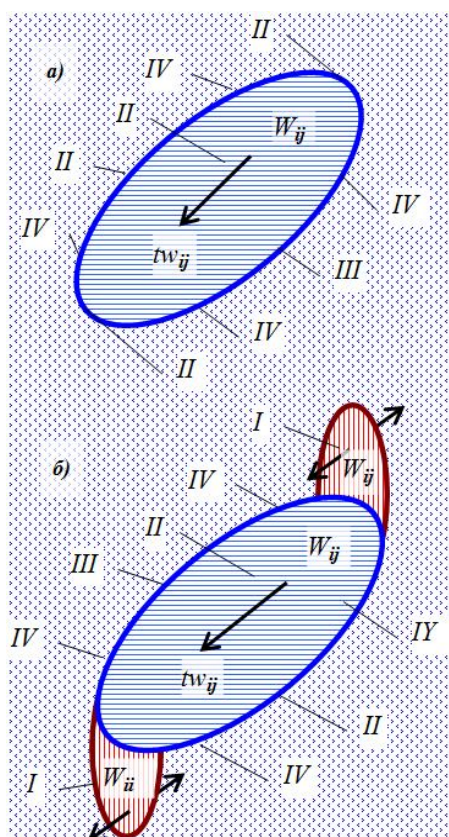


Рисунок 4 Распределение элементарных деформаций в окрестности объемного микросдвига (а) и комплексной поврежденности типа *Z*-ансамбля (б)

Как видно из рисунка 4, а, только на отдельных участках контура микросдвига *Z*-дефекта [10] можно идентифицировать один из типов элементарных краевых деформаций *I*, *II*, *III*. В остальных случаях краевая часть такого микродефекта подвержена сложному сочетанию *IV* элементарных деформаций *II*, *III* типа.

Z-ансамбли микродефектов образованы сразу тремя видами элементарных деформаций *I*, *II*, *III* и *IV*. Попытки введения сложных искусственных критериальных соотношений для определения трещиностойкости материалов не спасают положение, поскольку эти критерии дают прогноз устойчивости только в локальной области (по сути — в точке). Это же относится к обычным наклонным трещинам сдвига [6], где также требуется совместное рассмотрение условий равновесия трещин.

На самом деле, как нам представляется, процесс роста трещины происходит в несколько этапов. Исходной (первоначальной) трещиной, как правило, становятся:

- для материалов, в которых проявляются пластические свойства (например, металлы), — преобладающие начальные микросдвиги *II* вдоль направления максимальных касательных напряжений;
- для хрупких материалов (типа горных пород) первичными при росте внешней нагрузки являются микроразрывы *I* в виде пинч-эффекта в направлении деформаций растяжения, перпендикулярных минимальной компоненте напряжений.

По мере повышения напряженного состояния микросдвиги *II* растут, и их число в объеме тела увеличивается, концентрация растягивающих напряжений вблизи его концов приводит к появлению трещин отрыва *I*. Тем самым сдвиг преобразуется в *Z*-дефект (рис. 4, б), в котором центральное место занимает сдвиг *II*, а его «оперяют» две трещины отрыва *I*, направленные вдоль максимального нормального напряжения (считая, как в геомеханике, сжатие положительным, а растяжение — отрицательным). Схематически общий вид

Z-дефекта с качественной картиной распределения касательных напряжений представлен на рисунке 4.

4 Главные Wt_{ij} и встречные Wf_{ji} микросдвиги и микронапряжения

Ввиду термофлуктуационной природы возникновения микродефектов, необходимо учитывать, что на одной и той же диагональной площадке между ортами ij с максимальными касательными напряжениями τ_{ij} могут возникать 2 типа микросдвигов, имеющих взаимно противоположную ориентацию (направления общего сдвига):

Wt_{ij} — основной сдвиг (*true*), направленный вдоль действующего максимального касательного напряжения τ_{ij} ;

Wf_{ji} — обратный сдвиг (*false*), направленный против максимального касательного напряжения τ_{ij} .

Они по определению удовлетворяют тождеству

$$\Sigma W = Wt_{ij} + Wf_{ji} = Wt_{ij} - Wf_{ij}. \quad (1)$$

Соответственно, на встречных микросдвигах Wt_{ij} и Wf_{ji} будут действовать главные $\tau_{wt_{ij}}$ и обратные $\tau_{wf_{ji}}$ касательные микронапряжения противоположных знаков. По определению должно выполняться равенство

$$\Sigma(W \cdot \tau w) = Wt_{ij} \cdot \tau_{wt_{ij}} + Wf_{ji} \cdot \tau_{wf_{ji}}. \quad (2)$$

Отсюда можно найти результирующее сдвиговое микронапряжение $\tau_{w_{ij}}$ на сдвиговых участках тела (*W-area*):

$$\Sigma \tau w = (Wt \cdot \tau_{wt} + Wf \cdot \tau_{wf}) / \Sigma W. \quad (3)$$

Введение сдвиговых поврежденностей типов “*true*” и “*false*” обусловлено термофлуктуационной природой их возникновения и необходимостью в дальнейшем описывать состояние материала при знакопеременных нагрузках. Если действующие на тело внешние нагрузки знакопостоянны во

времени, то, ввиду чрезвычайной малости обратных сдвигов $Wf_{ij} \approx 0$, ими можно пренебречь, что заметно упрощает решение задач реономной микромеханики.

Поскольку поврежденности Wt и Wf известны из решения кинетических уравнений реономной микромеханики [11], можно найти макронапряжение tw по формуле (3). Разумеется, при «простых» путях изменения механических нагрузок тела в расчетах можно использовать только главные сдвиги, что заметно упростит математическую модель определения НДС.

5 Математическая модель расчета НДС микродефектного тела

Основываясь на предыдущих замечаниях, при построении математической модели используем обобщенный подход, позволяющий произвести описание всей совокупности микродефектов в материале на основе анализа макро- и микрораспределения напряжений. Однако точного определения особенностей распределения напряжений вокруг каждого из дефектов с полной детализацией производить не будем, а ограничимся определением усредненных напряжений на дефектных и упругих площадках. Следовательно, считаем микродефектное тело квазиоднородным с равномерным распределением по всему объему всех типов микродефектов.

Рассмотрим в материале характерный объем в виде куба единичных размеров, грани которого ориентированы по главным площадкам с ортами i, j, k . В общем случае на тело действуют макронапряжения σ_i ($i = 1, 2, 3$).

Материал в исходном состоянии считаем квазиоднородным и изотропным, а распределение напряжений будем определять для совокупности дефектов сдвига и разрыва, геометрия которых представлена в [10].

В рамках обычных решений теории упругости напряженное состояние тела в точке будет задано тремя напряжениями σ_i , действующими на главных площадках. Од-

нако в микродефектном теле уже нельзя говорить о напряжении в точке, поскольку необходимо рассматривать некоторый представительный объем материала, содержащий в среднем все типы микродефектов, и выполняющий роль точки в континуальной теории деформаций и напряжений.

Согласно известным соотношениям теории упругости, максимальные касательные напряжения τ_{ij} на площадках, наклоненных к главным под 45 градусов, будут равны

$$\tau_{ij} = (\sigma_i - \sigma_j) / 2. \quad (4)$$

В упругой области, которую будем иначе называть сплошностью T_{ij} , или U -area, и которая является дополнением к дефектной области W_{ij} (W -area) согласно соотношению

$$T_{ij} = 1 - W_{ij}, \quad (5)$$

действуют упругие касательные напряжения τu_{ij} . Здесь T_{ij} , W_{ij} — сплошность и поврежденность на диагональной площадке между главными площадками i и j .

Определим базовое соотношение между упругими τu_{ij} и сдвиговыми τw_{ij} касательными напряжениями на упругих T_{ij} и сдвиговых W_{ij} площадках. Исходя из условий равновесия, должно соблюдаться равенство

$$\tau_{ij} = \tau u_{ij} \cdot T_{ij} + \tau w_{ij} \cdot W_{ij}, \quad (i \neq j), \quad (6)$$

где τ_{ij} — среднеинтегральное значение напряжений сдвига, Па.

Исходя из условий прочности Pw_{ij} на сдвиговых участках, в качестве основного уравнения для определения сдвиговых напряжений на микросдвигах при прямом нагружении принимаем следующие условия:

$$\text{if } |\tau_{ij}| \leq Pw_{ij} \text{ then } \begin{vmatrix} \tau w_{ij} \\ \sigma w_i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \tau_{ij} \\ \sigma_i \end{vmatrix} \text{ else } \begin{vmatrix} Pw \\ 2Pw \cdot Wc_i \end{vmatrix} \quad (7)$$

При разгрузке материала происходит пропорциональное упругое снижение напряжений на всех площадках вплоть до момента, пока на сдвиговых площадках не наступит отрицательное значение сдвиговой прочности $\tau_{ij} \leq -Pw_{ij} \rightarrow \tau w_{ij} = -Pw_{ij}$.

После этого дальнейшая разгрузка происходит при фиксированном предельном значении касательных напряжений на сдвиговых площадках вплоть до момента очередной смены внешней нагрузки.

Тогда из условий равновесия сил на всей рассматриваемой площадке находим напряжения на упругой ее части (U -area) по формулам

$$\begin{aligned} \tau u_{ij} \cdot T_{ij} &= \tau_{ij} - \tau w_{ij} \cdot W_{ij}, \\ \sigma u_i \cdot Tc_i &= \sigma_i - \sigma w_i \cdot Wc_i. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, касательные напряжения τw_{ij} и τu_{ij} на участках W -area и U -area каждой диагональной площадки с индексом ij ($i, j = 1, 2, 3$) определены.

Для завершения задачи о напряженном состоянии материала с дефектами необходимо найти значения всех нормальных напряжений на упругих и сдвиговых участках каждой из площадок i, j, k ($i, j, k = 1, 2, 3$) по заданным внешним нагрузкам в виде нормальных σ_i и касательных τ_{ij} макронапряжений, а также с учетом вычисленных по формулам (7–8) микронапряжений τu_{ij} и τw_{ij} .

С этой целью используем прием разложения тензора напряжений на шаровую и девиаторную составляющие (рис. 5, 6).

При этом будем считать, что на существующее макрополе главных напряжений накладывается дополнительное поле, обусловленное отклонением касательных напряжений на упругих τu и сдвиговых τw площадках от макронапряжений τ . Эти приращения для каждой площадки ij ($i, j = 1, 2, 3$) находим по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta \tau u_{ij} &= \tau u_{ij} - \tau_{ij}, \\ \Delta \tau w_{ij} &= \tau w_{ij} - \tau_{ij}. \end{aligned} \quad (9)$$

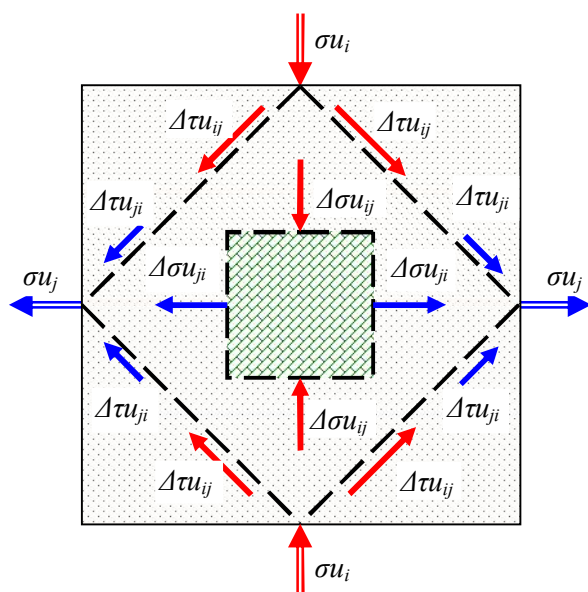


Рисунок 5 К определению нормальных микронапряжений на упругих участках материала

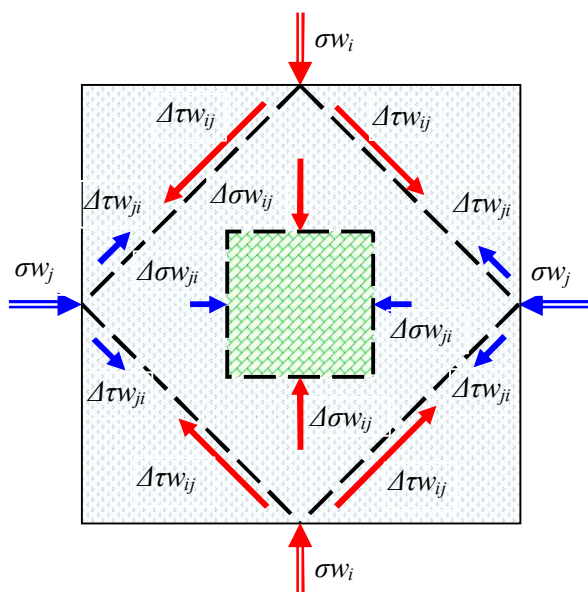


Рисунок 6 К определению нормальных микронапряжений на сдвиговых участках материала

Приращения напряжений будут создавать в материале состояние чистого сдвига, которое можно заменить эквивалентными приращениями нормальных напряжений

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{ij} &= \Delta\tau_{ij}, \\ \Delta\sigma_{w_{ij}} &= \Delta\tau_{w_{ij}}, \end{aligned} \quad (10)$$

причем соблюдаются равенства

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{ij} &= -\Delta\sigma_{ji}, \\ \Delta\sigma_{w_{ij}} &= -\Delta\sigma_{w_{ji}}, \end{aligned}$$

т. е. приращения нормальных напряжений антисимметричны.

Складывая с исходным полем напряжений σ_i , получим (рис. 7):

$$\begin{aligned} \sigma_{u_i} &= \sigma_i + \Delta\sigma_{ij} \cdot T_{ij} + \Delta\sigma_{ik} \cdot T_{ik}, \\ \sigma_{w_i} &= \sigma_i + \Delta\sigma_{w_{ij}} \cdot W_{ij} + \Delta\sigma_{w_{ik}} \cdot W_{ik}. \end{aligned} \quad (11)$$

На каждом из направлений i, j соответственно будем пользоваться известными формулами для средних напряжений, которые распространим на U-area и W-area:

$$\begin{aligned} \sigma_{n_{ij}} &= (\sigma_i + \sigma_j) / 2, \\ \sigma_{un_{ij}} &= (\sigma_{u_i} + \sigma_{u_j}) / 2, \\ \sigma_{wn_{ij}} &= (\sigma_{w_i} + \sigma_{w_j}) / 2, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\sigma_{n_{ij}}$, $\sigma_{un_{ij}}$, $\sigma_{wn_{ij}}$ — средние нормальные напряжения соответственно на общих, упругих и сдвиговых диагональных площадках с ориентацией i, j ;

σ_i , σ_{u_i} , σ_{w_i} — нормальные напряжения соответственно на общих, упругих и сдвиговых площадках с ориентацией i .

Соответственно, для касательных напряжений получаем соотношения

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= (\sigma_i - \sigma_j) / 2, \\ \tau_{u_{ij}} &= (\sigma_{u_i} - \sigma_{u_j}) / 2, \\ \tau_{w_{ij}} &= (\sigma_{w_i} - \sigma_{w_j}) / 2. \end{aligned} \quad (13)$$

На рисунке 8 показаны сдвиговые и нормальные напряжения на диагональной площадке с ориентацией i, j . Условно площадка разделена на две области — упругую и микросдвиговую, в каждой из которых действуют соответствующие нормальные и касательные напряжения. Определим нормальные напряжения в соответствии с рисунком 7. Для этого введем вспомогательные матрицы 2-го ранга для нормальных напряжений $\sigma_{u_{ij}}$, $\sigma_{w_{ij}}$, кото-

рые являются составными частями главных нормальных напряжений σu_i и σw_i на упругих и сдвиговых участках каждой из площадок ($i, j, k=1, 2, 3$). Эти напряжения выражаются по определению через уже ранее определенные касательные и нормальные напряжения $\tau u_{ij}, \tau w_{ij}, \sigma n_{ij}$ по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \sigma n_{ij} + \tau_{ij} = \sigma n_{ik} + \tau_{ik}, \\ \sigma u_i &= \sigma u n_{ij} + \tau u_{ij} = \sigma u n_{ik} + \tau u_{ik}, \\ \sigma w_i &= \sigma w n_{ij} + \tau w_{ij} = \sigma w n_{ik} + \tau w_{ik}. \end{aligned} \quad (14)$$

Введем вспомогательные переменные на основании рисунков 5–7:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma u_{ij} &= \Delta \tau u_{ij} + \Delta \tau u_{ji}, \\ \Delta \sigma w_{ij} &= \Delta \tau w_{ij} + \Delta \tau w_{ji}. \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда нормальные напряжения на направлении i, j можно найти по формуле

$$\begin{aligned} \sigma u u_{ij} &= \sigma_i + \Delta \sigma u_{ij}, \\ \sigma w w_{ij} &= \sigma_i + \Delta \sigma w_{ij}. \end{aligned} \quad (16)$$

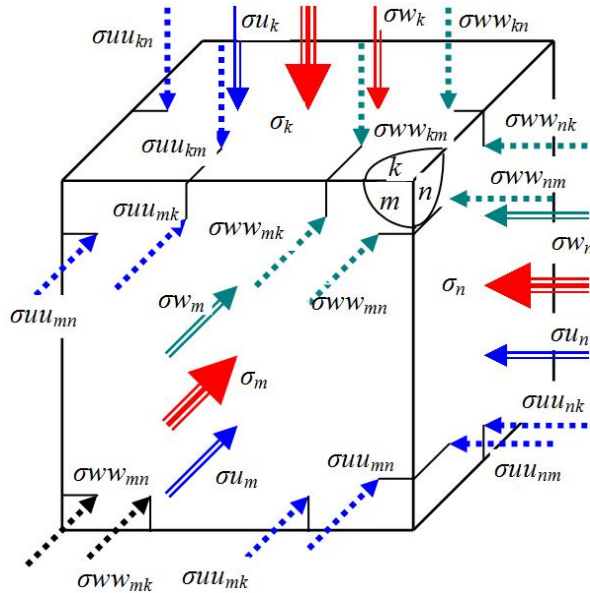


Рисунок 7 Совокупность нормальных напряжений на главных площадках в материале с микродефектами

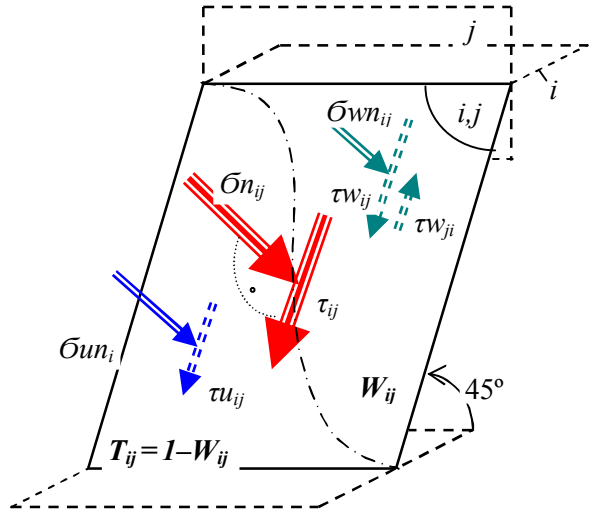


Рисунок 8 Совокупность касательных и средних напряжений на диагональной площадке i, j по направлению максимального сдвига τ_{ij}

Нормальные напряжения на диагональной площадке i, j будут определяться по формулам

$$\begin{aligned} \sigma u_i &= \frac{\sigma u u_{ij} \cdot T_{ij} + \sigma u u_{ik} \cdot T_{ik}}{T_{ij} + T_{ik}}, \\ \sigma w_i &= \frac{\sigma w w_{ij} \cdot W_{ij} + \sigma w w_{ik} \cdot W_{ik}}{W_{ij} + W_{ik}}. \end{aligned} \quad (17)$$

В качестве контрольного уравнения используем основное соотношение между нормальными напряжениями на i -площадке:

$$\sigma_i = \sigma u_i \cdot T c_i + \sigma w_i \cdot W c_i, \quad (18)$$

где

$$T c_i = 1 - W c_i; \quad W c_i = W_{ij} + W_{ik} + W_{ii}. \quad (19)$$

Таким образом, все напряжения в теле с микродефектами полностью определены. Отсюда видно, что наблюдаются равномерно рассеянные по всему объему тела значительные отличия напряжений на множестве мелких участков, приуроченных к микродефектам, что можно назвать фрагментацией напряжений. Такого же рода явления фрагментации были получены при изучении эволюции структуры ме-

таллов в процессе их деформации в пределах зерен или перлитных полуколоний при формировании кристаллографической текстуры [9]. В нашем случае фрагментация происходит в изначально однородном материале даже без исходной кристаллической структуры и обусловлена лишь термофлуктуационными процессами зарождения и роста ансамблей микродефектов.

6 Инженерный гистерезис при нагружении микродефектного тела

Вся совокупность напряжений в микродефектном теле существенным образом зависит от присущих для данного материала параметров прочности на сдвиговых и разрывных микродефектах.

Будем считать, что на сдвиговых площадках W_{ij} действуют касательные напряжения τw_{ij} , максимальное значение которых не может превышать некоторого предельного значения, обусловленного присущими для данного материала прочностными свойствами. В простейшем случае идеально пластичного материала касательные напряжения τw_{ij} на микросдвиговых дефектах W_{ij} ограничены прочностью на сдвиг Pw_{ij} и удовлетворяют неравенствам

$$-Pw_{ij} \leq \tau w_{ij} \leq Pw_{ij}, \quad (20)$$

где Pw_{ij} — предельное значение напряжений сдвига (прочность), Па.

Из (3) можно определить касательное напряжение на упругих площадках:

$$\tau u_{ij} = (\tau_{ij} - Pw_{ij} \cdot W_{ij}) / T_{ij}. \quad (21)$$

Равенство (21) будет справедливо при «простом» нагружении. Если, как это чаще всего наблюдается на практике, путь нагружения материала сопровождается разгрузкой (не обязательно однопараметрической), общая картина определения напряжений значительно усложняется. На рисунке 9 показаны закономерности изменения касательных τu_{ij} и τw_{ij} напряжений при изменении макронапряжения τ_{ij} . Графики построены при одном существенном допуще-

нии: размеры упругих T_{ij} и сдвиговых W_{ij} площадок остаются неизменными во времени, иными словами, они зафиксированы («заморожены»). Отказ от этого ограничения представляет собой особо сложную задачу, решение которой будет приведено в последующих публикациях. Проследим особенности изменения напряжений τu_{ij} и τw_{ij} в идеально пластическом теле при его нагружении сжатием и растяжением (рис. 9), т. е. при его нагрузке $\tau_{ij}^{\max} \geq \tau_{ij} \geq 0$ и разгрузке $-\tau_{ij}^{\max} \leq \tau_{ij} \leq \tau_{ij}^{\max}$.

При возрастании касательных напряжений τ_{ij} от 0 до предела пластичности Pw_{ij} напряженное состояние тела однородно, т. е. оно одинаково на упругих T_{ij} и сдвиговых W_{ij} участках: $\tau_{ij} = \tau u_{ij} = \tau w_{ij} \leq Pw_{ij}$. При дальнейшем росте $\tau_{ij} > Pw_{ij}$ касательные напряжения на дефектно-сдвиговых площадках (W -area) равны пределу пластичности $\tau w_{ij} = Pw_{ij}$, а на упругих площадках (U -area) касательные напряжения τu_{ij} становятся больше τ_{ij} , согласно равенству (21).

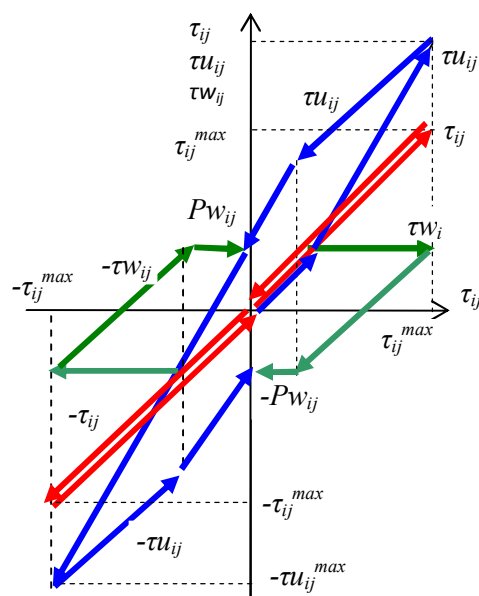


Рисунок 9 Петли гистерезиса для сдвиговых напряжений τu_{ij} и τw_{ij} при изменении касательных напряжений τ_{ij} в теле с идеальной пластичностью

При разгрузке путем снижения средних касательных напряжений в диапазоне $\tau_{ij}^{\max} > \tau_{ij} \geq Pw_{ij}$ напряжения τu_{ij} и τw_{ij} всюду снижаются по упругому закону подобно τ_{ij} вплоть до нижнего предела пластичности для $\tau w_{ij} = -Pw_{ij}$. В момент полного снятия внешней нагрузки при $\tau_{ij} = 0$ общая разгрузка тела не происходит: в упругой (*U-area*) области наблюдаются остаточные упругие напряжения $\tau u_{ij} = Pw_{ij}$, хотя в сдвиговой области сдвиговые напряжения снимаются $\tau w_{ij} = 0$.

Если продолжить разгрузку тела и перейти к его растяжению $-\tau_{ij}^{\max} \leq \tau_{ij} < 0$, получим графики, приведенные в третьем квадранте рисунка 9. Нетрудно заметить, что основные закономерности изменения напряжений τu_{ij} и τw_{ij} и их перераспределение между упругой и сдвиговой областями сохраняются. Вновь после полной разгрузки $\tau_{ij} \rightarrow 0$ наблюдаются остаточные напряжения в упругой области (*U-area*), где $\tau u_{ij} = -Pw_{ij}$, и в области *W-area*, в которой $0 > \tau w_{ij} < -Pw_{ij}$. Следовательно, такую циклическую смену разных ветвей изменения напряжений при нагрузке-разгрузке тела можно считать проявлением типичного инженерного гистерезиса. В отличие от классического, более сложный «инженерный гистерезис» обусловлен не остаточными явлениями в материале при смене направления нагрузки, а резким изменением его поведения в точках начала и конца достижения предела прочности на микросдвиговых участках.

Таким образом, если тело подверглось внешним нагрузкам τ_{ij}^{\max} , превысившим предел пластичности $\pm Pw_{ij}$, то после разгрузки в нем остается, как отпечаток предыстории нагружения, упругая область *U-area* с остаточными упругими напряжениями, равными $\pm Pw_{ij}$. Этот научный результат имеет не только теоретическое, но и большое прак-

тическое значение, позволяющее судить о предыстории нагружения твердого деформируемого тела и его дальнейшего поведения под нагрузкой. Особенную важность эта закономерность приобретает при циклических знакопеременных нагрузках материала, когда надо считаться с возникновением петли гистерезиса и рассеянием тепловой энергии на сдвиговых областях.

Однако нетрудно привести случай исключения из этого правила. Так, если тело на микросдвигах обладает хрупкими свойствами, т. е. в материале существуют закрытые микротрещины с сухим трением:

$$0 \leq \tau w_{ij} \leq f \cdot \sigma n w_{ij}, \quad (22)$$

где f — коэффициент трения; $\sigma n w_{ij}$ — нормальное напряжение на сдвиговой площадке w_{ij} , Па, и нет явно выраженного предела прочности на микросдвиговых участках, то петли гистерезиса отсутствуют (рис. 10).

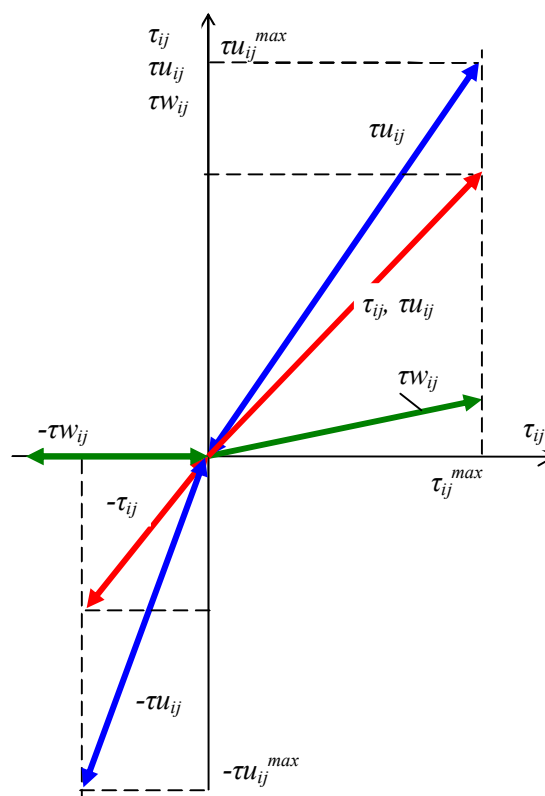


Рисунок 10 Зависимость сдвиговых напряжений τu_{ij} и τw_{ij} при изменении касательных напряжений τ_{ij} в хрупком теле с микродефектами без сцепления

При сжатии на сдвиговых микродефектах выполняется условие трения Кулона, а при растяжении берега микродефектов расходятся, и на них сдвиговые напряжения равны нулю. Соответственно, вырождаются графики изменения сдвиговых напряжений. Если на сдвиговом микродефекте нормальное среднее напряжение $\sigma n w_{ij}$ превышает удельную силу сцепления, петли гистерезиса отсутствуют, а диссипация энергии полностью исчезает.

Возможны и другие, более сложные случаи учета прочностных показателей материала, в частности те, которые наиболее полно можно учесть на основе аналитической теории прочности [11].

Пусть материал подчиняется уравнениям аналитической теории прочности [11], а его прочностные показатели в наиболее общем виде представлены в матричном виде:

– для упругих участков:

$$\tau \theta u_{ij}, \sigma \theta u_{ij}, \alpha u;$$

– для сдвиговых участков:

$$\tau \theta w_{ij}, \sigma \theta w_{ij}, \alpha w.$$

Тогда сдвиговые прочности на упругих Pu и микродефектных Pw площадках с индексом i, j можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} Pu_{ij} &= \tau \theta u_{ij} (Sun_{ij} / \sigma \theta u_{ij} + 1)^{\alpha u}, \\ Pw_{ij} &= \tau \theta w_{ij} (Swn_{ij} / \sigma \theta w_{ij} + 1)^{\alpha w}, \end{aligned} \quad (23)$$

где $\tau \theta u_{ij}, \sigma \theta u_{ij}, \alpha u$ и $\tau \theta w_{ij}, \sigma \theta w_{ij}, \alpha w$ — реономные параметры прочности материала (соответственно когезия сдвига, когезия отрыва) и параметр хрупкости для упругих и сдвиговых участков тела [11].

На разрывах I рода, которые возникают в соответствии с термофлуктуационным кинетическим уравнением (см. последующие публикации), прочность определяется удельной когезией отрыва, которая входит в общую матрицу прочности второго ранга и занимает в ней место главной диагонали.

Матричное представление прочностных параметров позволяет полностью учесть

любую прочностную анизотропию материала, что весьма важно для неоднородных и анизотропных горных пород и каменных материалов, которые зачастую обладают слоистостью и направленной трещиноватостью.

В действительности далеко не всегда следует ожидать таких идеальных зависимостей напряжений, поскольку более часты «смешанные» или постепенные, по мере нагружения, переходы к более сложным проявлениям прочности на микродефектных площадках.

Если τ_{ij} изменяется знакопеременно или циклично в пределах $-\tau_1 \leq \tau_{ij} \leq \tau_2$, а на микросдвигах присутствует сцепление, то во всех случаях появляются замкнутые взаимосвязанные петли инженерного гистерезиса на сдвиговых и упругих участках. Петли гистерезиса для напряжений τu_{ij} и τw_{ij} характеризуют количество упругой и рассеянной энергии при циклическом деформировании материала. Сами по себе циклы напряжений зависят от того, по какой схеме нагружения осуществляется изменение макронапряжения τ .

При полной разгрузке материала в первом квадранте диаграммы нагружения на основании соотношений (7, 8), поскольку $\tau_{ij} \rightarrow 0$, получаем значения остаточных напряжений:

$$\begin{aligned} \tau w_{ij} &= -Pw_{ij}; \\ \tau u_{ij} &= Pw_{ij} / (1 - W_{ij}). \end{aligned} \quad (24)$$

Если разгрузка произведена после отрицательных значений внешней нагрузки $-\tau_{ij} \rightarrow 0$, то значения $\tau w_{ij}, \tau u_{ij}$ меняют знак на противоположный.

Это открывает путь для разработки новых схем неразрушающих испытаний материалов. При этом, обеспечивая различные режимы циклического нагружения образцов, получим циклы (петли гистерезиса) на упругих и сдвиговых микродефек-

тах и возможность с более высокой простотой и степенью достоверности определять угол внутреннего трения и удельную силу сцепления на микросдвигах, т. е. основные параметры реономного поведения материалов [11].

На данном этапе исследований обнаруженные закономерности возникновения петель гистерезиса при циклическом изменении макронапряжений могут быть использованы в программах по численному моделированию реономного поведения материала.

Выводы:

1. Стремление добиться как можно более точного описания аномалий напряжений вокруг микродефектов путем решения краевых задач теории упругости оказалось малоперспективным, что требует перехода к новым, более сложным математическим моделям квазиоднородной среды с равномерно распределенными по всему объему тела ансамблями микродефектов.

2. Анализ закономерностей аномалий напряжений вокруг микродефектов типа сдвигов и разрывов показал их сложность из-за краевых сингулярностей напряжений, трудно отслеживаемых переходов элементарных микроразрывов и сдвигов, а также их сочетаний.

3. Для математического описания ансамблей микродефектов предложено использовать матричное представление, причем для микросдвигов введены понятия главных (истинных — *true*) и встречных (ложных — *false*) сдвигов.

4. Предложена математическая модель определения комплекса касательных и нормальных напряжений на упругих (*U-area*) и сдвиговых (*W-area*) участках тела, кото-

рые условно объединяют рассеянные по всему объему микродефекты и упругие элементы между ними. При этом основополагающую роль в математической модели играют принятые на основе предварительных экспериментальных данных прочностные показатели материала. В качестве таких показателей удобно использовать принятые в аналитической теории прочности [11] когезии сдвига τ_0 , разрыва σ_0 и параметр хрупкости α .

5. Оценки напряженного состояния микродефектного тела показывают на микродефектных и упругих участках тела существенное различие сдвиговых и касательных напряжений, т. е. наличие явно выраженной их фрагментации. При этом их фрагментация возникает не только из-за внутрикристаллической текстуры материала, но и в случае ее гомогенности после возникновения микродефектов в результате термофлуктуационного внешнего воздействия.

6. При знакопеременном нагружении материала с амплитудой выше порога прочности на микросдвиговых участках проявляется явление инженерного гистерезиса, что приводит после полной разгрузки к остаточным напряжениям противоположного знака на микродефектных (*W-area*) и упругих (*U-area*) участках. За счет этого явления происходит сохранение предыстории нагружения твердого тела, что можно положить в основу разработки новых методов лабораторных испытаний материалов.

7. Задачей дальнейших исследований является изучение поведения твердого тела с учетом времени и температуры с позиций термофлуктуационной (кинетической) концепции.

Библиографический список

1. Шермергор, Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред [Текст] / Т. Д. Шермергор. — М. : Наука, 1977. — 400 с.
2. Екобори, Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел [Текст] / Т. Екобори. — М. : Металлургия, 1971. — 264 с.

3. Макклиток, Ф. Деформация и разрушение материалов [Текст] / Ф. Макклиток, А. Аргон. — М.: Мир, 1970. — 444 с.
4. Boudifa, M. A micromechanical model for inelasmic ductile damage prediction in polycrystalline metals for metal forming [Text] / M. Boudifa, K. Saanouni, J.-L. Chaboche // *Int. J. Mech. Sci.* — 2009. — V. 51. — P. 453–464.
5. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Претворение [Текст]: пер. с англ. / Дж. Коллинз; под ред. Э. И. Григолюка. — М., 1984. — 624 с.
6. Черепанов, Г. П. Механика разрушения [Текст] / Г. П. Черепанов. — М. — Ижевск: Изд. ИКИ, 2012. — 872 с. — (Математика и механика).
7. Сосновский, Л. Концепции поврежденности материалов [Текст] / Л. Сосновский, С. Щербаков // *Вестник ТНТУ*. — 2011. — Спецвыпуск. — Ч. 1. — С. 14–23.
8. Биргер, И. А. Детерминированные и статистические модели суммирования повреждений [Текст] / И. А. Биргер // *Проблемы прочности*. — 1978. — № 11. — С. 3–11.
9. Золотаревский, Р. Ю. Фрагментация и текстурообразование при деформации металлических материалов [Текст] / Р. Ю. Золотаревский, В. В. Рыбин. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. — 208 с.
10. Литвинский, Г. Г. Ансамбли и структуры микродефектов в твердом теле (горной породе) [Текст] / Г. Г. Литвинский // *Сб. науч. трудов ДонГТИ*. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — № 26 (69). — С. 5–15.
11. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Донецк: Норд-Пресс, 2008. — 207 с.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зам. директора
института РАНМИ АН ДНР Дрибаном В. А.,
к.т.н., доц., проректором по научной работе ДонГТИ Смекалиным Е. С.**

Статья поступила в редакцию 01.06.2022.

Doctor of Technical Sciences, Prof. Litvinskiy G. G. (DonSTI, Alchevsk, LPR, ligag@ya.ru)

FRAGMENTATION OF STRESSES IN THE BODY WITH MICRODEFECTS

The desire to increase the description reliability of the materials behavior under thermomechanical influences requires a transition to increasingly complex mathematical models. This paper presents a new model of the stress-strain state (SSS) of a solid with microdefects under its arbitrary loading. Based on a qualitative analysis of distribution regularities of the microdefects of shift and fracture type, the stress anomalies in their vicinity are assessed. The parameters of the mathematical model of SSS, the main prerequisites and limitations are selected and justified. The influence of strength indicators on microshifts and fractures is considered and assessed. The fragmentation of stresses over the entire volume of the body caused by microdefects is proved. For the first time, a system of SSS equations was obtained, micro-mechanisms of the hysteresis loops formation under alternating loading of the body were shown, the difference in stresses on elastic and defects body areas was assessed.

Key words: microshift, microfracture, SSS theory, mathematical model, elastic and microdefects areas, stress fragmentation, strength parameters, hysteresis loops.

УДК 622.8

Ноженко А. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, asauton@mail.ru)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВЗРЫВОВ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ШАХТАХ И ИХ ЛОКАЛИЗАЦИИ

Приведены новые технические решения, направленные на снижение пылеобразующей способности газоносных угольных пластов и повышение эффективности водяных заслонов для локализации взрывов угольной пыли в горных выработках.

Ключевые слова: угольная пыль, взрыв, пылеобразующая способность, предварительное увлажнение угольных пластов, композиция, водяной заслон.

Одним из самых значимых факторов производственной опасности техногенного и природного происхождения, определяющим величину рисков аварий в подземных горных выработках, является угольная пыль. Применение высокопроизводительных машин и механизмов для разрушения массива угольных пластов приводит к выделению в шахтную атмосферу значительного количества угольной пыли, самые мелкие частицы которой способны находиться в течение длительного времени во взвешенном состоянии.

В результате интенсификации горных работ в последние годы наблюдается рост содержания наиболее опасных тонких фракций пыли, увеличение скорости подаваемого в забой воздуха и протяженности горных выработок. Все это приводит к повышению интенсивности пылеотложения. По данным ВостНИИ, на большинстве шахт Кузбасса и Воркуты она достигает такого уровня, при котором работы по приведению выработок во взрывобезопасное состояние необходимо проводить каждые 15–30 минут работы [1].

Очень часто требуемый комплекс мероприятий по борьбе с пылью и обеспечению пылевзрывозащиты горных выработок выполнить достаточно сложно. Поэтому фактически принимаемые меры не всегда в полной мере соответствуют требованиям нормативных документов и фактической пылевой обстановке. Контроль запыленности рудничной атмосферы и пылевзрыво-

опасности горных выработок продолжает оставаться малоэффективным. Следствием этого являются крупные аварии в угольных шахтах, вызванные взрывами с участием угольной пыли.

Например, за период 2003–2013 годов на угольных шахтах Российской Федерации около 26 % аварийных ситуаций (от 8 % в 2008 до 66 % в 2009 г.) были связаны со вспышками, взрывами метана, угольной пыли, что повлекло гибель 84 % от общего числа погибших во всех авариях за эти 10 лет. Примерно треть этих аварийных ситуаций инициировала развитие пожаров [2]. За период 2005–2019 гг. в результате 50 вспышек, взрывов и возмнений метана и угольной пыли было травмировано 645 человек, из них смертельно — 367 человек [3].

Таким образом, предотвращение взрывов с участием угольной пыли в горных выработках угольных шахт продолжает оставаться актуальной проблемой.

В настоящее время разработаны и широко применяются способы по предупреждению и локализации взрывов угольной пыли, основанные на использовании воды и объединенные в единый комплекс гидрозащиты от взрывов угольной пыли в шахтах. Для повышения эффективности гидрозащиты в воду часто добавляют различные химические вещества, которые при попадании в открытые водные объекты могут негативно влиять на их экологическое состояние.

Задачей исследований является повышение эффективности, надежности и экологической безопасности средств, направленных на снижение пылеобразующей способности угольных пластов и локализацию взрывов угольной пыли в горных выработках.

Современные способы и средства предупреждения взрывов угольной пыли в шахтах направлены на создание и поддержание таких условий, при которых возникновение взрыва исключается. В связи с этим способы и средства предупреждения взрывов угольной пыли можно подразделить на способы, препятствующие образованию и распространению угольной пыли по сети горных выработок; способы, препятствующие накоплению и переходу пыли во взвешенное состояние; способы, препятствующие воспламенению угольной пыли.

К мероприятиям, препятствующим образованию пыли при разработке угольных пластов, относится главным образом предварительное увлажнение угольных пластов. Сущность предварительного увлажнения заключается в нагнетании в угольный пласт (до его разработки) в режиме фильтрации воды. В результате этого вода проникает в поры и трещины угольного массива, а также в места скопления материнской (природной) пыли, связывая её. В настоящее время применяется несколько технологических схем и способов предварительного увлажнения угольных пластов, использование которых обусловлено конкретными горно-геологическими и горно-техническими условиями. Для более равномерного и качественного влагонасыщения угольного пласта применяют различные водные растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ), электролитов, полимеров и некоторых других веществ, которые в значительной мере повышают эффективность снижения пылеобразующей способности угольных пластов [4, 5].

С целью увеличения качества предварительного увлажнения газонасыщенных угольных пластов (абсолютное большинст-

во в Донбассе являются таковыми) возможно применение рабочих жидкостей с температурой более низкой, чем температура массива угля. Снижение температуры флюида вызывает сжатие метана и содействует проникновению жидкости вглубь угольного массива за счёт уменьшения противодавления газа. Кроме того, у жидкости, которая поглощает тепло пласта, уменьшается вязкость. Из-за этого нагнетаемый флюид лучше проникает в мелкие поры и капилляры, повышая капиллярное влагонасыщение угольного пласта и снижая пылеобразующую способность угля [6].

Широкое применение в качестве смачивателей в угольной промышленности нашли оксиэтилированные алкилфенолы — смачиватель ДБ (моно- и диалкилфениловые эфиры полиэтиленгликоля) с уровнем биоразлагаемости 39 %. Для современных ПАВ, применяемых в качестве компонентов средств для снижения пылеобразования, уровень биоразлагаемости должен составлять не менее 80 % [7]. Водные растворы ДБ для гидрообеспыливания и пылевзрывозащиты начали применяться ещё с 1960-х гг. и продолжают использоваться до настоящего времени [8]. В 1970–1980 гг. в Коммунарском горно-металлургическом институте (ныне — Донбасский государственный технический институт (ДонГТИ)) был разработан ряд высокоэффективных рабочих жидкостей для снижения пылеобразующей способности угольных пластов, одним из компонентов которых являлся смачиватель ДБ. Например, состав для обработки газонасыщенного угольного пласта, который содержит смачиватель ДБ массовой концентрацией 0,1–0,3 %, азотнокислый аммоний массовой концентрацией 25,0–30,0 %, вода — остальное [9]. Но в последние десятилетия установлено вредное влияние ДБ на организм человека, и в настоящее время его запрещено сбрасывать в поверхностные водоёмы.

В 2010 году в ДонГТУ с учётом требований экологической безопасности была разработана более совершенная композиция для снижения пылеобразующей способно-

сти газоносных угольных пластов, содержащая смесь поверхностно-активного вещества, азотнокислого аммония и воды, где в качестве поверхностно-активного вещества используется смесь C_{10} - C_{20} -алкилсульфатов, C_{10} - C_{20} -алкилсульфонатов, алифатических углеводородов фракции C_{10} - C_{20} , предельных спиртов фракции C_{10} - C_{20} при следующем соотношении компонентов, масс. %: C_{10} - C_{20} -алкилсульфаты — 0,005–0,03; C_{10} - C_{20} -алкилсульфонаты — 0,02–0,04; алифатические углеводороды фракции C_{10} - C_{20} — 0,01–0,02; предельные спирты фракции C_{10} - C_{20} — 0,07–0,1; азотнокислый аммоний — 25–30; вода — остальное.

Этот состав жидкости имеет исходную температуру $-2,2 \dots -5,5$ °С, что позволяет при закачке его в угольный пласт повысить скорость фильтрации жидкости и прохождения ее к наименьшим фильтрационным порам и трещинам за счет снижения противодавления метана, которое осуществляется при его охлаждении, и увеличения поверхностной активности состава в сравнении с раствором смачивателя ДБ. Уровень удельного пылевыведения при разрушении образцов угля, увлажненной этой жидкостью, на 51–57 % ниже, чем при увлажнении угля 0,01 %-ным раствором ДБ. Предлагаемый состав для снижения пылеобразующей способности газоносных угольных пластов имеет степень биоразлагаемости более 80 %, что отвечает современным требованиям экологической безопасности, и значительно уменьшает отрицательное влияние на водные объекты [10]. Недостатком данной композиции для снижения пылеобразующей способности угольных пластов является наличие в ней азотнокислого аммония. Попадая в водные объекты в большом количестве, соединения азота вызывают снижение количества растворенного в воде кислорода, появление неприятного цвета и запаха, бурный рост микроскопических водорослей, гибель рыб и других гидробионтов.

Более эффективной является композиция, содержащая смесь ПАВ и воду, которая от-

личается тем, что в качестве компонента, снижающего температуру жидкости, она содержит твердый диоксид углерода при таком соотношении компонентов, масс. %: C_{10} - C_{20} -алкилсульфаты — 0,007–0,04; C_{10} - C_{20} -алкилсульфонаты — 0,01–0,03; алифатические углеводороды фракции C_{10} - C_{20} — 0,015–0,025; предельные спирты фракции C_{10} - C_{20} — 0,05–0,12; твердый диоксид углерода — 8–10; вода — остальное.

Предлагаемую композицию закачивают в газоносный угольный пласт сразу после смешивания ингредиентов, которое обеспечивает ее температуру в пределах от +1 °С до –1 °С. Уровень удельного пылевыведения при разрушении образцов угля, увлажненных этой жидкостью, на 45–65 % ниже, чем при увлажнении угля 0,01 %-ным раствором ДБ. Предлагаемая композиция для снижения пылеобразующей способности газоносных угольных пластов не содержит неорганических веществ, которые являются загрязнителями гидросферы, позволяет уменьшить транспортные и эксплуатационные расходы за счет более низкой концентрации компонента, снижающего температуру флюида [11].

В настоящее время в качестве основного средства пылевзрывозащиты используются пассивные водяные и сланцевые заслоны, которые позволяют изолировать наиболее вероятные очаги взрывов на шахтах. Для локализации взрывов угольной пыли в горных выработках широкое распространение получили водяные заслоны. Они не уступают по надёжности и эффективности локализации взрывов сланцевым заслонам, но более удобны в эксплуатации. Однако из-за высокой скорости испарения воды из сосудов и значительной роли человеческого фактора при пополнении их водой они не всегда обеспечивают высокую надёжность локализации взрывов.

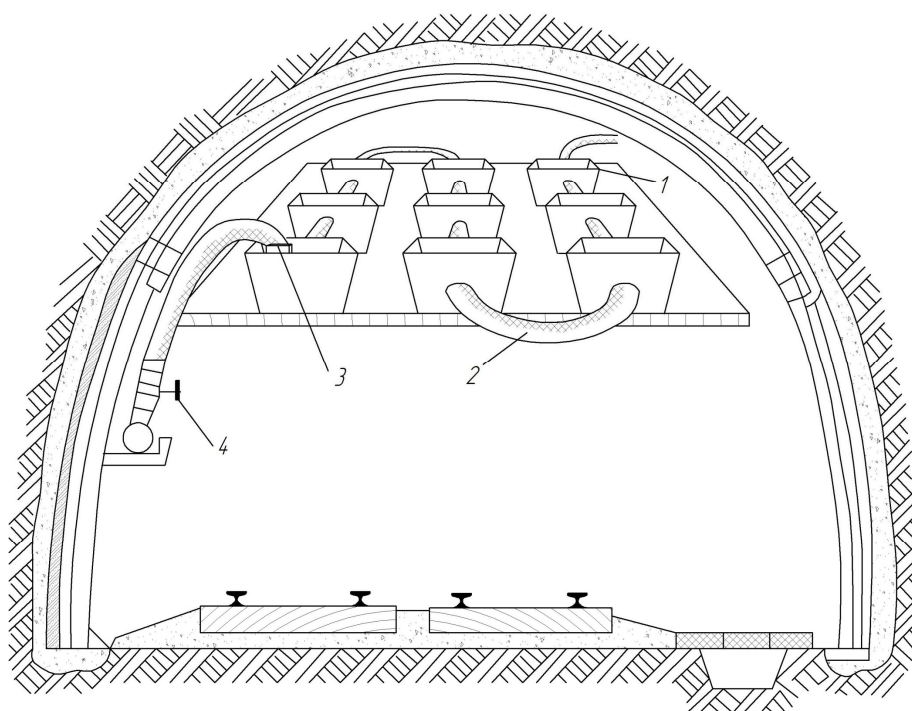
С целью устранения этого недостатка к воде в сосудах добавляли различные химические вещества (хлориды кальция, магния, пленкообразующие полимеры). Однако этот способ сложен и дорог. При-

мерно в 3–4 раза уменьшает скорость испарения воды укрытие сосуда полиэтиленовой пленкой, но при больших скоростях движения воздуха она сдувается с сосуда. Опытно-промышленная проверка водяных заслонов, оснащенных крышками из ударопрочного полистирола, показала их достаточно высокую эффективность. Однако при этом затруднительно контролировать уровень воды в сосудах заслона [12, 13].

Более совершенным является водяной заслон для локализации взрывов угольной пыли в горных выработках, который состоит из нескольких поперечных рядов полимерных сосудов, заполненных водой и расположенных в верхней части выработки на продольных рейках, отличающийся тем, что все сосуды на протяжении всего заслона горной выработки гидравлически связаны между собой гофрированными резиноканевыми шлангами, а между сосудами соединительные шланги

имеют достаточную слабины, которая не мешает им опрокидываться при ударе взрывной волны. При этом все сосуды, а главное их водные поверхности, находятся в одной горизонтальной плоскости, а один из гидравлически связанных сосудов оборудован поплавковым клапаном и соединяется с шахтным водопроводом с помощью вентиля. При этом поплавковый клапан регулируется и устанавливается на уровне воды в сосуде и обеспечивает достаточный объем воды для взрывогашения (рис. 1).

По мере испарения воды в любом из сосудов водяного заслона в сосуде с поплавковым клапаном снизится уровень воды, что приведет к открытию входного отверстия клапана, через который в гидравлическую систему будет поступать вода, пока во всех сосудах водяного заслона (сообщающиеся сосуды) не установится необходимый для взрывогашения уровень воды [14].



1 — полимерный сосуд; 2 — гофрированный резиноканевый шланг;
3 — поплавковый клапан; 4 — вентиль

Рисунок 1 Конструкция водяного заслона для локализации взрывов угольной пыли в горных выработках

Использование рабочих жидкостей для снижения пылеобразующей способности газоносных угольных пластов с предложенной рецептурой и соответствующих современным требованиям экологической безопасности позволит уменьшить пылеотложение по сети горных выработок и снизить вероятность возникновения взрывов с участием угольной пыли. При разработке новых рецептур рабочих жидкостей целесообразно применение ПАВ с более высоким уровнем биоразлагаемости и смачивающей способности по отношению к угольной пыли.

Применение водяного заслона для локализации взрывов угольной пыли предла-

гаемой конструкции исключает человеческий фактор, что повышает эффективность взрывогашения благодаря обеспечению постоянного объема воды в сосудах, достаточного для локализации взрыва угольной пыли в любой момент его использования, значительно сокращает необходимую периодичность контроля над уровнем воды в сосудах заслона и исключает работы по доливке воды в сосуды действующих заслонов. При дальнейшем совершенствовании конструкции водяных заслонов необходимо разработать автоматическую систему непрерывного контроля их работоспособности.

Библиографический список

1. Литвинов, А. Р. Аварийность и травматизм на предприятиях угольной промышленности [Текст] / А. Р. Литвинов, К. С. Коликов, О. Г. Иихнели // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2017. — № 2. — С. 6–17.
2. Основные направления работы Ростехнадзора по контролю над состоянием промышленной безопасности и снижению аварийности в угледобывающей отрасли России [Текст] / Г. П. Ермак, С. В. Мясников, В. В. Скотов, Г. С. Гендлер // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 7. Промышленная безопасность минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. — 2015. — С. 265–275.
3. Анализ причин взрывов, вспышек и воспламенений метана в угольных шахтах России в 2005–2019 гг. [Текст] / Е. И. Кабанов, Г. И. Корицунов, А. В. Корнев, В. В. Мяков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2-1. — С. 18–29.
4. Ицук, И. Г. Средства комплексного обеспыливания горных предприятий [Текст] : справочник / И. Г. Ицук, Г. А. Поздняков. — М. : Недра, 1991. — 273 с.
5. Химические вещества для борьбы с пылью [Текст] / В. И. Саранчук, В. П. Журавлёв, И. В. Вейсенберг и др. — К. : Наукова думка, 1987. — 156 с.
6. Давиденко, В. А. Повышение эффективности снижения пылевых выбросов в атмосферный воздух населенных пунктов Донбасса [Текст] / В. А. Давиденко, Т. С. Олейник, Е. В. Скрипник // Экологический вестник Донбасса. — 2021. — № 1. — С. 11–18.
7. Давиденко, В. А. Обоснование необходимости применения экологически безопасных рабочих жидкостей для снижения пылеобразующей способности угольных пластов [Текст] / В. А. Давиденко, А. А. Ноженко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2017. — № 5 (48). — С. 31–36.
8. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело [Текст] : учебник для вузов / К. З. Ушаков, Н. О. Каледина, Б. Ф. Кирич и др. ; под. общ. ред. К. З. Ушакова. — 2-е изд., стер. — М. : Изд-во МГГУ, 2008. — 487 с.
9. А. с. 861651 СССР, МКИ E21F7/00/. Состав для обработки газоносного угольного пласта / В. А. Давиденко, Е. А. Будзило, Ю. Т. Товстогань, В. А. Касьянов, А. И. Векличев ; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 2785261/22-03 ; заявл. 13.06.79 ; опубл. 07.09.81, Бюл. № 33. — 4 с.
10. Пат. 94884С2 Украина, МПК E21 F5/00. Композиция для снижения пылеобразующей способности газоносных угольных пластов / В. А. Давиденко, А. А. Ноженко ; заявитель и патентообладатель Донбас. гос. техн. ун-т. — № a201012862 ; заявл. 29.10.2010 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11. — 4 с.

11. Пат. 104814С2 Украина, МПК E21 F5/06. Композиция для снижения пылеобразующей способности угольных пластов / В. А. Давиденко, А. А. Ноженко ; заявитель и патентообладатель Донбас. гос. техн. ун-т. — № 201301223 ; заявл. 01.02.2013 ; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 15. — 4 с.
12. Нецепляев, М. И. Гидрозащита от взрывов угольной пыли в шахтах [Текст] / М. И. Нецепляев, П. М. Петрухин, В. М. Кравец. — К. : Техніка, 1980. — 132 с.
13. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах [Текст] / М. И. Нецепляев, А. И. Любимова, П. М. Петрухин и др. — М. : Недра, 1992. — 298 с.
14. Пат. 88142 Украина, МПК E21F 5/14. Водяной заслон для локализации взрывов угольной пыли в горных выработках / В. А. Давиденко, Н. И. Антощенко, А. А. Ноженко, И. Б. Шульга ; заявитель и патентообладатель Донбас. гос. техн. ун-т. — № a201301224 ; заявл. 01.02.2013 ; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 13. — 2 с.

© Ноженко А. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТИ Смекалиным Е. С.,
к.г.н., доц. каф. СиА ФЭиБ ЛГУ им. В. Даля Горовой Н. А.*

Статья поступила в редакцию 01.06.2022.

Nozhenko A. A. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, acauton@mail.ru*)

IMPROVING THE MEANS OF PREVENTING COAL DUST EXPLOSIONS IN MINES AND THEIR LOCALIZATION

New engineering solutions aimed at reducing the dust-forming ability of gas-bearing coal seams and increasing the effectivity of water barriers for localization of coal dust explosions in mine workings are presented.

Key words: *coal dust, explosion, dust-forming ability, pre-humidification of coal seams, composition, water barrier.*

**МЕТАЛЛУРГИЯ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCES**

УДК 621.771.011

д.т.н. Яковченко А. В.,
к.т.н. Денищенко П. Н.,
Кравцова С. И.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, kravtsosveta@gmail.com),
Ивлева Н. И.
(ДонНИИчермет, г. Донецк, ДНР, ivl22@mail.ru)

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МЕТОД И КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТОЧНЕННЫХ КОНСТАНТ ФОРМУЛ РАСЧЕТА ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ГРУПП МАРОК СТАЛЕЙ

Разработаны усовершенствованные метод и компьютерная программа расчета уточненных констант формул, определяющих термокинетические параметры в теории расчета напряжения течения металла с учетом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации как для отдельных марок сталей, так и для групп (до 25 марок сталей). Выполнен расчет уточненных констант формул, определяющих термокинетические параметры для групп из двух марок сталей: 0,5С — 0,2Si — 0,68Mn, 0,06С — 0,12Si — 0,42Mn и трёх марок сталей: 45, 08, 55. При этом средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения металла по отношению к экспериментальным составили 4–10 %.

Ключевые слова: напряжение течения металла при горячей пластической деформации; константы, определяющие термокинетические параметры; компьютерная база цифровой информации об экспериментальных кривых напряжения течения металла; сплайн-интерполяция кривых течения; компьютерная программа.

В работе [1] показано, что константы, определяющие термокинетические параметры в формуле (1) [2] расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации не обеспечивают приемлемую точность расчетов во всем заявленном диапазоне изменения состава химических элементов:

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

где σ_y , σ_p , ε_p , ε_x — термокинетические параметры: σ_p — пиковое значение напряжения σ на кривой течения, соответствует пиковой деформации ε_p ; σ_y — установившееся напряжение, при котором наступает равновесие процессов упрочнения и динамической рекристаллизации при достижении деформации ε_x .

Термокинетические параметры, определяющие кривые течения сталей, выражаются следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \sigma_p &= n_1 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_1}; \quad \sigma_y = n_2 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_2}; \\ \varepsilon_x &= n_3 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_3}; \quad \varepsilon_p = n_4 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_4}, \end{aligned} \quad (2)$$

а входящие в них константы, найденные в работе [2], равны

$$\begin{aligned} n_1 &= 72,06, m_1 = 0,131, n_2 = 51,66, m_2 = 0,149, \\ n_3 &= 0,193, m_3 = 0,112, n_4 = 0,268, m_4 = 0,107. \end{aligned}$$

Влияние химического состава стали отражается величиной энергии активации деформации Q (кДж · моль⁻¹), которая входит в комплексный температурно-скоростной параметр процесса деформации (параметр Зинера — Холломона (Z)); A — скоростная константа деформируемого материала [2].

В формулах (2) [2] значения констант n_1 , m_1 , n_2 , m_2 , n_3 , m_3 , n_4 , m_4 найдены на базе информации, полученной из экспериментальных кривых течения для группы, включающей 27 марок углеродистых сталей.

Известно, что проблема моделирования реологических свойств относится к наиболее важным и сложным задачам теории обработки металлов давлением. Важное значение теория [2] расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации получила в процессе реализации конечно-элементных методов исследований напряженно-деформированного состояния металла в процессах обработки металлов давлением. Поэтому задача определения уточненных значений констант $n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3, n_4, m_4$ для различных групп марок сталей имеет высокую актуальность.

В работе поставлена задача разработки усовершенствованного метода и компьютерной программы расчета уточненных констант формул расчета термокинетических параметров для различных групп марок сталей. На базе созданной в работе [1]

математической модели планируется определить уточненные константы, входящие в формулы расчета термокинетических параметров, для двух групп марок углеродистых сталей. Также будет выполнен сравнительный анализ относительных отклонений расчетных значений напряжения течения σ (полученных на базе исходных [2] и уточненных констант) по отношению к экспериментальным данным.

С использованием математической модели, полученной в [1], разработаны усовершенствованные метод и компьютерная программа расчёта уточненных констант $n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3, n_4, m_4$, определяющих термокинетические параметры в формуле (2) [2] расчета напряжения течения металла для различных групп марок сталей. Окно усовершенствованной программы показано на рисунке 1. Предусмотрена возможность включения в группу до 25 марок сталей.

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

Количество марок сталей: 2

Пределы изменения факторов

	ϵ_{\min}	ϵ_{\max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min. (град.С)	T max. (град.С)
Сталь 0.50C-0.25Si-0.68Mn	0.05	1.8	0.01	0.1	900	1100
Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn	0.05	1.8	0.01	0.1	900	1100

Расчет напряжения течения металла

по экспериментальным кривым упрочнения

Количество ϵ : 100
Количество T: 10
Количество U: 10

Химический состав (%)

Наименование	Сталь 0.50C-0.25Si-0.68Mn
C (0.05 - 1.1)	0.50
Si (0 - 1.65)	0.2
Mn (0.03 - 1.55)	0.68
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.038
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.28

по формулам Солода В.С. и др.

Выполнить

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

Сталь 0.50C-0.25Si-0.68Mn

Q 212395.631065

n	$\sigma_{\text{расч.}}$ (МПа)	Δ (%)
1	42.207	30.660
2	48.160	28.797
3	53.105	27.546
4	57.175	26.870
5	60.488	26.456
6	63.147	26.210
7	65.243	26.224
8	66.855	26.368
9	68.053	26.532
10	68.899	26.697
11	69.446	26.873
12	69.741	26.718

Δ ср (%) 26.200

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

Начальные параметры

n	m
n1 87.683658	m1 0.209860
n2 80.444385	m2 0.209331
n3 0.106152	m3 0.166243
n4 0.223541	m4 0.151958

Выполнить

Новая итерация

n	$\sigma_{\text{расч.}}$ (МПа)	Δ (%)
1	54.810	9.956
2	63.334	6.361
3	69.696	4.911
4	74.366	4.882
5	77.723	5.502
6	80.065	6.440
7	81.632	7.692
8	82.609	9.017
9	83.146	10.238
10	83.357	11.314
11	83.333	12.250

Δ ср (%) 8.404

Графики <<Назад

Рисунок 1 Окно расчета уточненных констант для групп марок сталей (на примере сталей 0,5C—0,2Si—0,68Mn и 0,06C—0,12Si—0,42Mn)

В верхнюю часть окна передается информация о пределах изменения факторов ε , U , T в соответствии с разработанными на основе метода [4] базами цифровой экспериментальной информации о напряжении течения для каждой стали.

Ниже в окне задается химический состав каждой стали, который используется при расчете величины энергии активации деформации Q по формуле [2]. Предусмотрена возможность просмотра информации поочередно для каждой стали, входящей в группу.

Слева в окне задаются цифровые значения, например $\varepsilon(100)$, $T(10)$, $U(10)$, которые означают следующее. Так, при каждом из 10 значений температуры (в пределах изменения фактора T) выполняется построение 10 кривых $\sigma=f(\varepsilon)$ напряжения течения каждой стали по экспериментальным данным при 10 фиксированных значениях скорости деформации (в пределах изменения фактора U). Затем по каждой кривой течения стали при 100 фиксированных значениях степени деформации (в пределах изменения фактора ε) выполняется определение соответствующих значений σ . При этом используются компьютерная база цифровой экспериментальной информации о напряжении течения каждой стали и предложенный в [4] метод сплайн-интерполяции при определении значений напряжения течения металла, причём не только для точек, лежащих на кривых течения, но и для любых других сочетаний значений степени деформации ε , скорости деформации U и температуры T в диапазоне их изменения на исходных экспериментальных кривых.

Массив значений ε , U , T , σ для всех сталей отображается в левой нижней части окна программы. При заданных значениях $\varepsilon(100)$, $T(10)$, $U(10)$ массив включает 100 тыс. значений σ при соответствующих значениях степени, скорости деформации и температуры. Указанные выше цифровые значения, определяющие указанный массив, в процессе расчета можно изме-

нять, добиваясь наилучшей точности расчёта искомым констант.

В [7] разработана функция компьютерной программы расчета напряжения течения металла по формуле (1), учитывающей процессы динамического преобразования структуры металла при его горячей пластической деформации, которая используется в настоящих исследованиях. В средней части окна выполняется расчет соответствующих значений σ по этой формуле, то есть с учётом исходных констант, приведенных под формулой (2). При этом определяется среднее относительное отклонение расчетных значений по отношению к экспериментальным. Указанное отклонение, найденное по двум маркам сталей по 100 тыс. точек равно 26,2 %.

Затем на базе математической модели [1] выполняется определение уточненных констант $n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3, n_4, m_4$. При этом для различных марок сталей определяются и учитываются соответствующие значения величины энергии активации деформации Q . Найденные уточненные константы даются под окошком «Выполнить» (см. рис. 1) в правой части окна программы.

В правом верхнем углу окна задаются используемые в математической модели исходные константы. На первом этапе в качестве исходных констант в автоматическом режиме задаются и используются константы, найденные в работе [2]. На следующих этапах расчёта исходные константы можно корректировать для получения лучшего результата. Также в процессе расчёта уточненных констант можно организовать итерационный процесс, при котором найденные на предыдущем шаге значения задаются в качестве исходных на следующем шаге. Это важный элемент усовершенствованного метода определения уточненных констант.

В правой части окна выполняется расчет соответствующих значений σ на базе уточненных констант, определяющих термокинетические параметры (2) в формуле расче-

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

та напряжения течения металла (1). При этом среднее относительное отклонение расчетных значений по отношению к экспериментальным, найденное по двум маркам сталей по 100 тыс. точек, равно 8,4 %.

Функция программы «Переход к каталогу» дает возможность добавить компьютерную базу экспериментальных данных по напряжению течения для следующей марки стали. Возможно также и удалить любую из ранее заданных марок сталей.

На рисунках 2–5 в окнах программы представлены результаты расчетов по проверке точности аппроксимации экспериментальных данных, выполненные по методу и программе, созданным в работе [4].

Средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным показаны в таблице 1. В окнах, представленных на рисунках 3 и 5, установлено, что проверка адекватности модели на базе исходных констант [2] по критерию Фишера дала неудовлетворительные результаты.

На рисунке 6 приведены соответствующие экспериментальные (показаны линией 1) и расчётные (показаны линиями 2, 3) кривые. Расчётные кривые, полученные на базе исходных констант [2], показаны линией 2. Расчётные кривые, полученные на базе уточненных в настоящей работе констант, показаны линией 3.

Метод моделирования напряжения течения углеродистых, низколегированных и микролегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Имя файла: КАТАЛОГ\Сталь 0,50C-0,2Si-0,68Mn

Пределы изменения факторов

ε_{\min}	ε_{\max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min. (град.С)	T max. (град.С)
0.05	1.8	0.01	0.1	900	1100

Химический состав (%)

C (0.05 - 1.1)	0.50
Si (0 - 1.65)	0.2
Mn (0.03 - 1.55)	0.68
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.038
V (0 - 0.25)	
Cu (0 - 0.28)	0.28

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1.2154	-1	0	+1	+1.2154	
Натуральные значения факторов	ε	0.05	0.2051	0.9250	1.6449	1.8
	U (1/c)	0.01	0.018	0.055	0.092	0.1
	T (град.С)	900	917.723	1000.000	1082.277	1100

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп.}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.2051	0.018	917.723	92.359
2	+1	-1	-1	1.6449	0.018	917.723	80.292
3	-1	+1	-1	0.2051	0.092	917.723	116.633
4	+1	+1	-1	1.6449	0.092	917.723	109.495
5	-1	-1	+1	0.2051	0.018	1082.277	46.049
6	+1	-1	+1	1.6449	0.018	1082.277	43.712
7	-1	+1	+1	0.2051	0.092	1082.277	62.491
8	+1	+1	+1	1.6449	0.092	1082.277	57.373
9	-1.2154	0	0	0.05	0.055	1000.000	57.940
10	+1.2154	0	0	1.8	0.055	1000.000	71.272
11	0	-1.2154	0	0.9250	0.01	1000.000	52.632
12	0	+1.2154	0	0.9250	0.1	1000.000	76.019
13	0	0	-1.2154	0.9250	0.055	900	100.760
14	0	0	+1.2154	0.9250	0.055	1100	50.241
15	0	0	0	0.9250	0.055	1000.000	71.263

Результаты расчета

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

σ (МПа)	Δ (%)
87.980	4.741
80.840	0.682
121.416	4.101
113.772	3.906
50.292	9.213
46.860	7.201
71.819	14.926
65.946	14.942
54.765	5.480
76.411	7.210
53.471	1.594
86.723	14.081
109.789	8.961
56.274	12.008

$\Delta_{\text{ср}}$ (%) 7.756

Q 212395.631
A 36174093.436

Q по формуле В.С. Солода и др.
 Q по формуле S.F. Medina и др.
 Q по объединенной формуле
 Усовершенствованный метод

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
Fрасч 52.931 Fтабл 3.59 Fрасч > Fтабл (адекватность обоснована)

Выполнить

Дополнительно Графики <<Назад Далее>>

Рисунок 2 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 0,5C—0,2Si—0,68Mn [3] на базе уточненных констант

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Метод моделирования напряжения течения углеродистых, низколегированных и микролегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Имя файла: КАТАЛОГ\Сталь 0,50C-0,2Si-0,68Mn

Пределы изменения факторов

ε_{\min}	ε_{\max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min. (град.С)	T max. (град.С)
0.05	1.8	0.01	0.1	900	1100

Химический состав [%]

C (0.05 - 1.1)	0.50
Si (0 - 1.65)	0.2
Mn (0.03 - 1.55)	0.68
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.038
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.28

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	ε	U (1/c)	T (град.С)	
-1, 2154	-1	0	+1, 2154	
0.05	0.2051	0.9250	1.6449	1.8
0.01	0.018	0.055	0.092	0.1
900	917.723	1000.000	1082.277	1100

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп.}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.2051	0.018	917.723	92.359
2	+1	-1	-1	1.6449	0.018	917.723	80.292
3	-1	+1	-1	0.2051	0.092	917.723	116.633
4	+1	+1	-1	1.6449	0.092	917.723	109.495
5	-1	-1	+1	0.2051	0.018	1082.277	46.049
6	+1	-1	+1	1.6449	0.018	1082.277	43.712
7	-1	+1	+1	0.2051	0.092	1082.277	62.491
8	+1	+1	+1	1.6449	0.092	1082.277	57.373
9	-1.2154	0	0	0.05	0.055	1000.000	57.940
10	+1.2154	0	0	1.8	0.055	1000.000	71.272
11	0	-1.2154	0	0.9250	0.01	1000.000	52.632
12	0	+1.2154	0	0.9250	0.1	1000.000	76.019
13	0	0	-1.2154	0.9250	0.055	900	100.760
14	0	0	+1.2154	0.9250	0.055	1100	50.241
15	0	0	0	0.9250	0.055	1000.000	71.263

Результаты расчета

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

σ (МПа)	Δ (%)
70.903	23.231
51.975	35.268
85.503	26.691
66.627	39.151
51.390	11.597
36.178	19.523
63.142	1.042
44.900	21.739
42.180	27.200
49.853	30.053
39.630	24.704
57.983	23.726
70.029	30.499
41.223	17.950

Δ ср (%) 23.919

Q 212395.631
A 36174093.436

Q по формуле В.С. Солода и др.
 Q по формуле S.F. Medina и др.
 Q по объединенной формуле
 Усовершенствованный метод

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
Fрасч 1.465 Fтабл 3.59 Fрасч < Fтабл (адекватность не обоснована)

Выполнить

Рисунок 3 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 0,5C—0,2Si—0,68Mn [3] на базе исходных констант [2]

Метод моделирования напряжения течения углеродистых, низколегированных и микролегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Имя файла: КАТАЛОГ\Сталь 0,06C-0,12Si-0,42Mn

Пределы изменения факторов

ε_{\min}	ε_{\max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min. (град.С)	T max. (град.С)
0.05	1.8	0.01	0.1	900	1100

Химический состав [%]

C (0.05 - 1.1)	0.06
Si (0 - 1.65)	0.12
Mn (0.03 - 1.55)	0.42
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.005
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.13

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	ε	U (1/c)	T (град.С)	
-1, 2154	-1	0	+1, 2154	
0.05	0.2051	0.9250	1.6449	1.8
0.01	0.018	0.055	0.092	0.1
900	917.723	1000.000	1082.277	1100

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп.}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.2051	0.018	917.723	93.508
2	+1	-1	-1	1.6449	0.018	917.723	83.080
3	-1	+1	-1	0.2051	0.092	917.723	115.586
4	+1	+1	-1	1.6449	0.092	917.723	111.072
5	-1	-1	+1	0.2051	0.018	1082.277	51.419
6	+1	-1	+1	1.6449	0.018	1082.277	49.759
7	-1	+1	+1	0.2051	0.092	1082.277	62.747
8	+1	+1	+1	1.6449	0.092	1082.277	61.014
9	-1.2154	0	0	0.05	0.055	1000.000	51.838
10	+1.2154	0	0	1.8	0.055	1000.000	73.378
11	0	-1.2154	0	0.9250	0.01	1000.000	62.083
12	0	+1.2154	0	0.9250	0.1	1000.000	87.333
13	0	0	-1.2154	0.9250	0.055	900	107.733
14	0	0	+1.2154	0.9250	0.055	1100	54.285
15	0	0	0	0.9250	0.055	1000.000	73.434

Результаты расчета

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

σ (МПа)	Δ (%)
74.053	20.806
67.970	18.187
103.404	10.539
95.656	13.879
52.471	2.047
48.768	1.991
74.780	19.177
68.631	12.485
52.425	1.133
71.972	1.916
50.364	18.876
81.653	6.504
89.655	16.780
59.747	10.062

Δ ср (%) 10.422

Q 129311.109
A 18829.164

Q по формуле В.С. Солода и др.
 Q по формуле S.F. Medina и др.
 Q по объединенной формуле
 Усовершенствованный метод

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
Fрасч 8.262 Fтабл 3.59 Fрасч > Fтабл (адекватность обоснована)

Выполнить

Рисунок 4 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn [3] на базе уточненных констант

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Метод моделирования напряжения течения углеродистых, низколегированных и микролегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Имя файла: КАТАЛОГ\Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn

Пределы изменения факторов

ε_{\min}	ε_{\max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.05	1.8	0.01	0.1	900	1100

Химический состав (%)

C (0.05 - 1.1)	0.06
Si (0 - 1.65)	0.12
Mn (0.03 - 1.55)	0.42
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.005
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.13

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп}}$ (МПа)
-1.2154	-1	0	0	
0	0	0	0	
+1	+1	0	0	
+1.2154	+1	0	0	
0.05	0.05	0.01	900	93.508
0.2051	0.2051	0.018	917.723	83.080
0.9250	0.9250	0.092	917.723	115.586
1.6449	1.6449	0.092	917.723	111.072
0.2051	0.2051	0.018	1082.277	51.419
0.9250	0.9250	0.018	1082.277	49.759
0.2051	0.2051	0.092	1082.277	62.747
0.9250	0.9250	0.092	1082.277	61.014
0.05	0.05	0.055	1000.000	51.838
1.8	1.8	0.055	1000.000	73.378
0.9250	0.9250	0.01	1000.000	62.083
0.1	0.1	0.9250	1000.000	87.333
900	900	0.055	900	107.733
1100	1100	0.055	1100	54.285
1000.000	1000.000	0.055	1000.000	73.434

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.2051	0.018	917.723	93.508
2	+1	-1	-1	1.6449	0.018	917.723	83.080
3	-1	+1	-1	0.2051	0.092	917.723	115.586
4	+1	+1	-1	1.6449	0.092	917.723	111.072
5	-1	-1	+1	0.2051	0.018	1082.277	51.419
6	+1	-1	+1	1.6449	0.018	1082.277	49.759
7	-1	+1	+1	0.2051	0.092	1082.277	62.747
8	+1	+1	+1	1.6449	0.092	1082.277	61.014
9	-1.2154	0	0	0.05	0.055	1000.000	51.838
10	+1.2154	0	0	1.8	0.055	1000.000	73.378
11	0	-1.2154	0	0.9250	0.01	1000.000	62.083
12	0	+1.2154	0	0.9250	0.1	1000.000	87.333
13	0	0	-1.2154	0.9250	0.055	900	107.733
14	0	0	+1.2154	0.9250	0.055	1100	54.285
15	0	0	0	0.9250	0.055	1000.000	73.434

Результаты расчета

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

σ (МПа)	Δ (%)
64.256	31.283
45.884	44.771
77.819	32.674
58.704	47.147
52.688	2.467
36.194	27.262
64.615	2.978
46.204	24.274
40.737	21.414
47.764	34.907
37.852	39.031
55.258	36.727
59.546	44.728
43.184	20.450

$\Delta_{\text{ср}}$ (%) 29.468

Справка

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
 Fрасч 0.552 Fтабл 3.59 Fрасч < Fтабл (адекватность не обоснована)

Выполнить

Рисунок 5 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn [3] на базе исходных констант [2]

Таблица 1

Средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным, полученных на базе исходных $\delta_{\text{и}}$ (2) и уточненных констант $\delta_{\text{у}}$ для группы из двух марок сталей

Марки сталей	Химический состав сталей, %	Константы	Отклонение, %																																					
			$\delta_{\text{и}}$	$\delta_{\text{у}}$																																				
0,5C—0,2Si—0,68Mn, [3]	<table border="1"> <thead> <tr><th>Наименование</th><th>Сталь 0.50C-0.2Si-0.68Mn</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>C (0.05 - 1.1)</td><td>0.50</td></tr> <tr><td>Si (0 - 1.65)</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>Mn (0.03 - 1.55)</td><td>0.68</td></tr> <tr><td>Cr (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>Ni (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>P (0 - 0.05)</td><td>0.002</td></tr> <tr><td>S (0 - 0.05)</td><td>0.038</td></tr> <tr><td>V (0 - 0.26)</td><td></td></tr> <tr><td>Cu (0 - 0.28)</td><td>0.28</td></tr> </tbody> </table>	Наименование	Сталь 0.50C-0.2Si-0.68Mn	C (0.05 - 1.1)	0.50	Si (0 - 1.65)	0.2	Mn (0.03 - 1.55)	0.68	Cr (0 - 0.3)		Ni (0 - 0.3)		P (0 - 0.05)	0.002	S (0 - 0.05)	0.038	V (0 - 0.26)		Cu (0 - 0.28)	0.28	<table border="1"> <tbody> <tr><td>n1</td><td>87.684012</td><td>m1</td><td>0.209691</td></tr> <tr><td>n2</td><td>80.446809</td><td>m2</td><td>0.209433</td></tr> <tr><td>n3</td><td>0.106107</td><td>m3</td><td>0.162897</td></tr> <tr><td>n4</td><td>0.223476</td><td>m4</td><td>0.150220</td></tr> </tbody> </table>	n1	87.684012	m1	0.209691	n2	80.446809	m2	0.209433	n3	0.106107	m3	0.162897	n4	0.223476	m4	0.150220	23,9	7,8
Наименование	Сталь 0.50C-0.2Si-0.68Mn																																							
C (0.05 - 1.1)	0.50																																							
Si (0 - 1.65)	0.2																																							
Mn (0.03 - 1.55)	0.68																																							
Cr (0 - 0.3)																																								
Ni (0 - 0.3)																																								
P (0 - 0.05)	0.002																																							
S (0 - 0.05)	0.038																																							
V (0 - 0.26)																																								
Cu (0 - 0.28)	0.28																																							
n1	87.684012	m1	0.209691																																					
n2	80.446809	m2	0.209433																																					
n3	0.106107	m3	0.162897																																					
n4	0.223476	m4	0.150220																																					
0,06C—0,12Si—0,42Mn, [3]	<table border="1"> <thead> <tr><th>Наименование</th><th>Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>C (0.05 - 1.1)</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>Si (0 - 1.65)</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Mn (0.03 - 1.55)</td><td>0.42</td></tr> <tr><td>Cr (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>Ni (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>P (0 - 0.05)</td><td>0.002</td></tr> <tr><td>S (0 - 0.05)</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>V (0 - 0.26)</td><td></td></tr> <tr><td>Cu (0 - 0.28)</td><td>0.13</td></tr> </tbody> </table>	Наименование	Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn	C (0.05 - 1.1)	0.06	Si (0 - 1.65)	0.12	Mn (0.03 - 1.55)	0.42	Cr (0 - 0.3)		Ni (0 - 0.3)		P (0 - 0.05)	0.002	S (0 - 0.05)	0.005	V (0 - 0.26)		Cu (0 - 0.28)	0.13		29,5	10,4																
Наименование	Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn																																							
C (0.05 - 1.1)	0.06																																							
Si (0 - 1.65)	0.12																																							
Mn (0.03 - 1.55)	0.42																																							
Cr (0 - 0.3)																																								
Ni (0 - 0.3)																																								
P (0 - 0.05)	0.002																																							
S (0 - 0.05)	0.005																																							
V (0 - 0.26)																																								
Cu (0 - 0.28)	0.13																																							

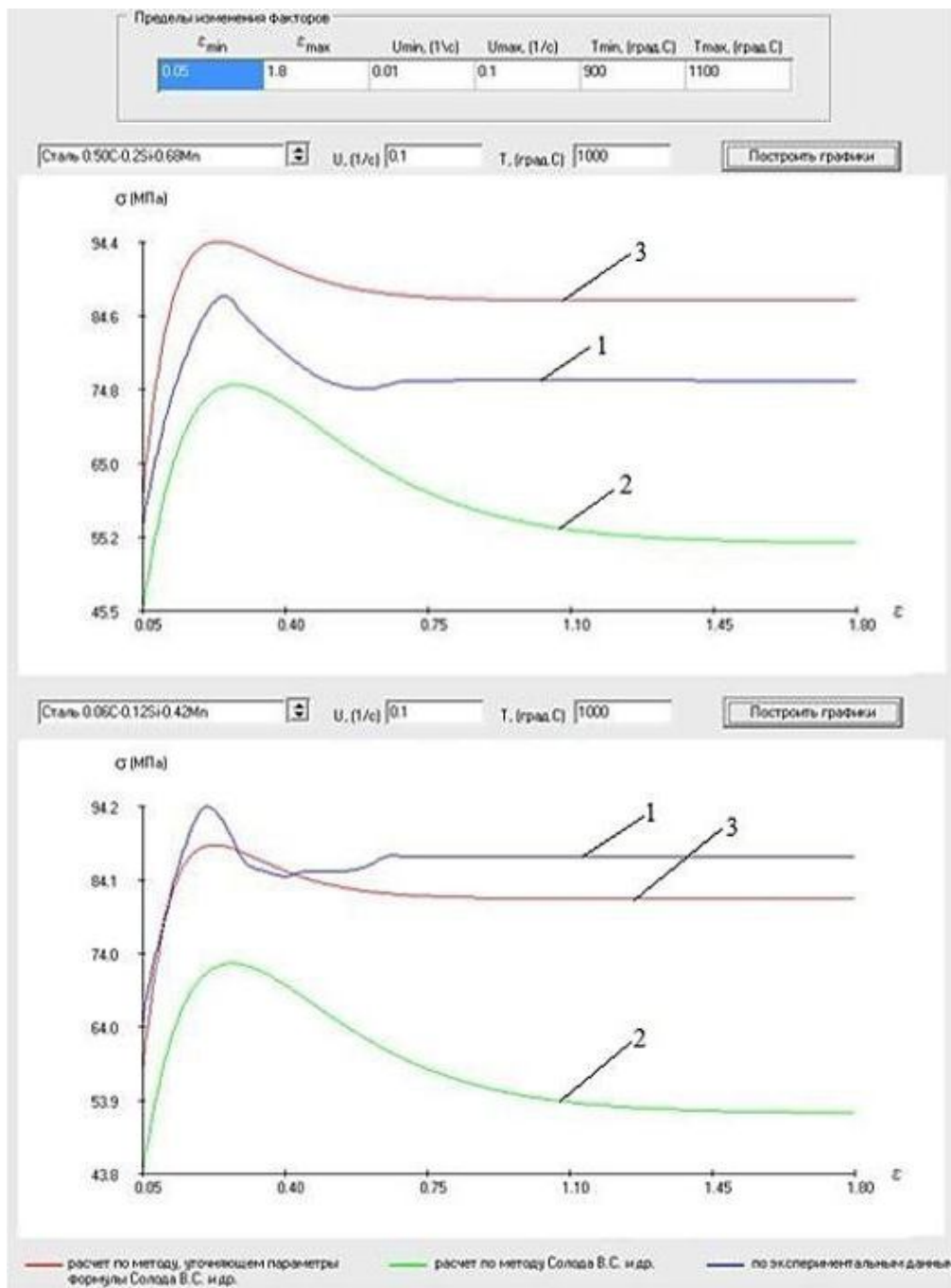


Рисунок 6 Экспериментальные и расчётные кривые напряжения течения сталей 0,5С—0,2Si—0,68Mn и 0,06С—0,12Si—0,42Mn $\sigma=f(\epsilon)$ при фиксированных значениях U , T

Рассмотрим также группу из трёх углеродистых марок сталей. Результаты расчётов уточненных констант, определяющих термокинетические параметры в формуле (2) [2] расчета напряжения течения металла для группы из марок сталей 45, 08, 55 представлены в таблице 2 и на рисун-

ках 7–9. По сталям 08 и 55 средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным на базе уточненных констант δ_y получены меньшими, чем на базе исходных констант δ_n (2). Результаты расчетов по стали 45 получены близкими.

Таблица 2

Средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным (для группы из трёх марок сталей)

Марка стали	Химический состав стали, %	Константы	Отклонение, %																																					
			$\delta_{и}$	$\delta_{у}$																																				
Сталь 45, [6]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Наименование</th> <th>Сталь 45</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C (0.05 - 1.1)</td><td>0.43</td></tr> <tr><td>Si (0 - 1.65)</td><td>0.26</td></tr> <tr><td>Mn (0.03 - 1.55)</td><td>0.74</td></tr> <tr><td>Cr (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>Ni (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>P (0 - 0.05)</td><td>0.022</td></tr> <tr><td>S (0 - 0.05)</td><td>0.016</td></tr> <tr><td>V (0 - 0.26)</td><td></td></tr> <tr><td>Cu (0 - 0.28)</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Наименование	Сталь 45	C (0.05 - 1.1)	0.43	Si (0 - 1.65)	0.26	Mn (0.03 - 1.55)	0.74	Cr (0 - 0.3)		Ni (0 - 0.3)		P (0 - 0.05)	0.022	S (0 - 0.05)	0.016	V (0 - 0.26)		Cu (0 - 0.28)		<table border="1"> <tbody> <tr><td>n1</td><td>61.343150</td><td>m1</td><td>0.161166</td></tr> <tr><td>n2</td><td>36.772599</td><td>m2</td><td>0.204126</td></tr> <tr><td>n3</td><td>0.266166</td><td>m3</td><td>0.040946</td></tr> <tr><td>n4</td><td>0.336268</td><td>m4</td><td>0.050152</td></tr> </tbody> </table>	n1	61.343150	m1	0.161166	n2	36.772599	m2	0.204126	n3	0.266166	m3	0.040946	n4	0.336268	m4	0.050152	5,6	6,2
Наименование	Сталь 45																																							
C (0.05 - 1.1)	0.43																																							
Si (0 - 1.65)	0.26																																							
Mn (0.03 - 1.55)	0.74																																							
Cr (0 - 0.3)																																								
Ni (0 - 0.3)																																								
P (0 - 0.05)	0.022																																							
S (0 - 0.05)	0.016																																							
V (0 - 0.26)																																								
Cu (0 - 0.28)																																								
n1	61.343150	m1	0.161166																																					
n2	36.772599	m2	0.204126																																					
n3	0.266166	m3	0.040946																																					
n4	0.336268	m4	0.050152																																					
Сталь 08, [6]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Наименование</th> <th>Сталь 08</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C (0.05 - 1.1)</td><td>0.087</td></tr> <tr><td>Si (0 - 1.65)</td><td>0.003</td></tr> <tr><td>Mn (0.03 - 1.55)</td><td>0.34</td></tr> <tr><td>Cr (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>Ni (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>P (0 - 0.05)</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>S (0 - 0.05)</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>V (0 - 0.26)</td><td></td></tr> <tr><td>Cu (0 - 0.28)</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Наименование	Сталь 08	C (0.05 - 1.1)	0.087	Si (0 - 1.65)	0.003	Mn (0.03 - 1.55)	0.34	Cr (0 - 0.3)		Ni (0 - 0.3)		P (0 - 0.05)	0.025	S (0 - 0.05)	0.02	V (0 - 0.26)		Cu (0 - 0.28)		12,6	7,7																	
Наименование	Сталь 08																																							
C (0.05 - 1.1)	0.087																																							
Si (0 - 1.65)	0.003																																							
Mn (0.03 - 1.55)	0.34																																							
Cr (0 - 0.3)																																								
Ni (0 - 0.3)																																								
P (0 - 0.05)	0.025																																							
S (0 - 0.05)	0.02																																							
V (0 - 0.26)																																								
Cu (0 - 0.28)																																								
Сталь 55, [6]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Наименование</th> <th>Сталь 55</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C (0.05 - 1.1)</td><td>0.55</td></tr> <tr><td>Si (0 - 1.65)</td><td>0.24</td></tr> <tr><td>Mn (0.03 - 1.55)</td><td>0.73</td></tr> <tr><td>Cr (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>Ni (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>P (0 - 0.05)</td><td>0.014</td></tr> <tr><td>S (0 - 0.05)</td><td>0.016</td></tr> <tr><td>V (0 - 0.26)</td><td></td></tr> <tr><td>Cu (0 - 0.28)</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Наименование	Сталь 55	C (0.05 - 1.1)	0.55	Si (0 - 1.65)	0.24	Mn (0.03 - 1.55)	0.73	Cr (0 - 0.3)		Ni (0 - 0.3)		P (0 - 0.05)	0.014	S (0 - 0.05)	0.016	V (0 - 0.26)		Cu (0 - 0.28)		9,1	3,7																	
Наименование	Сталь 55																																							
C (0.05 - 1.1)	0.55																																							
Si (0 - 1.65)	0.24																																							
Mn (0.03 - 1.55)	0.73																																							
Cr (0 - 0.3)																																								
Ni (0 - 0.3)																																								
P (0 - 0.05)	0.014																																							
S (0 - 0.05)	0.016																																							
V (0 - 0.26)																																								
Cu (0 - 0.28)																																								

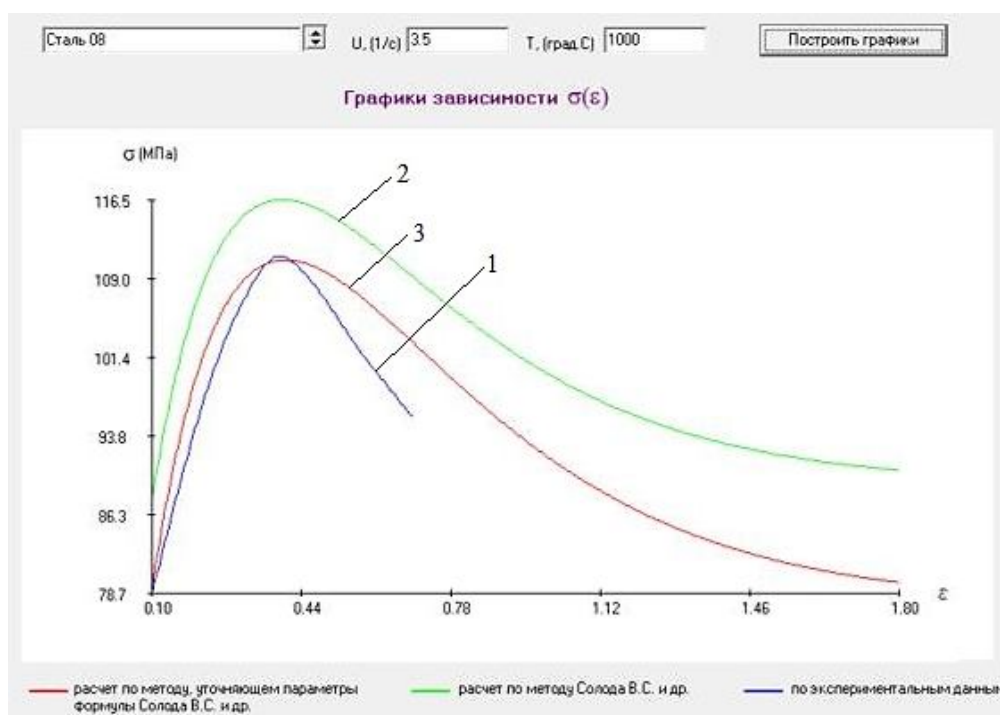


Рисунок 7 Экспериментальные и расчётные кривые напряжения течения стали 08 $\sigma=f(\epsilon)$ при фиксированных значениях U, T

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

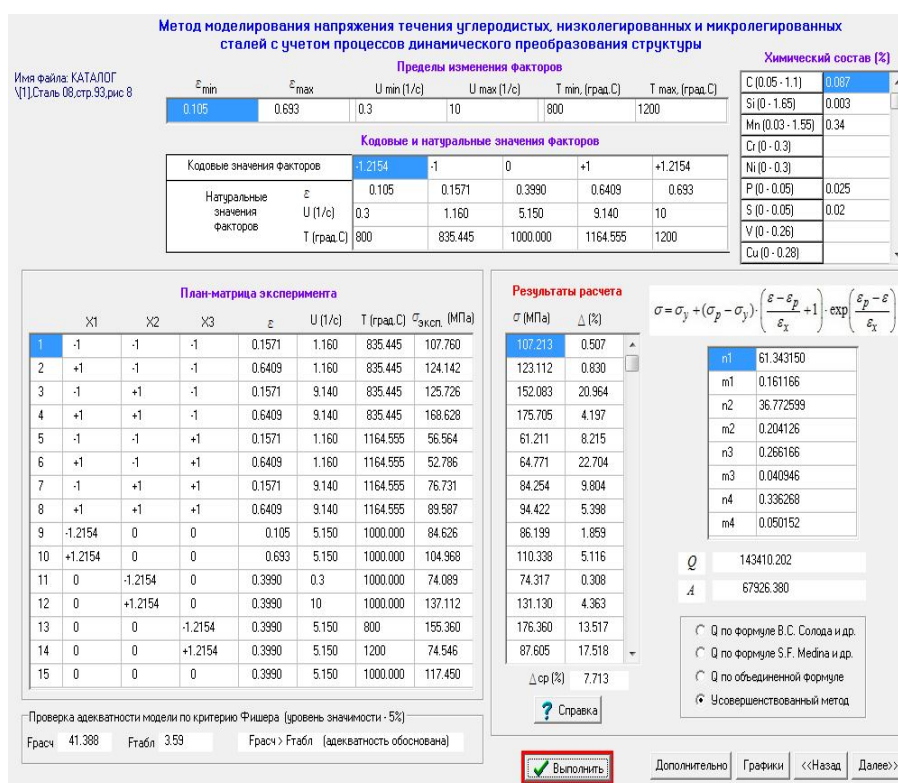


Рисунок 8 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 08 [6] на базе уточненных констант

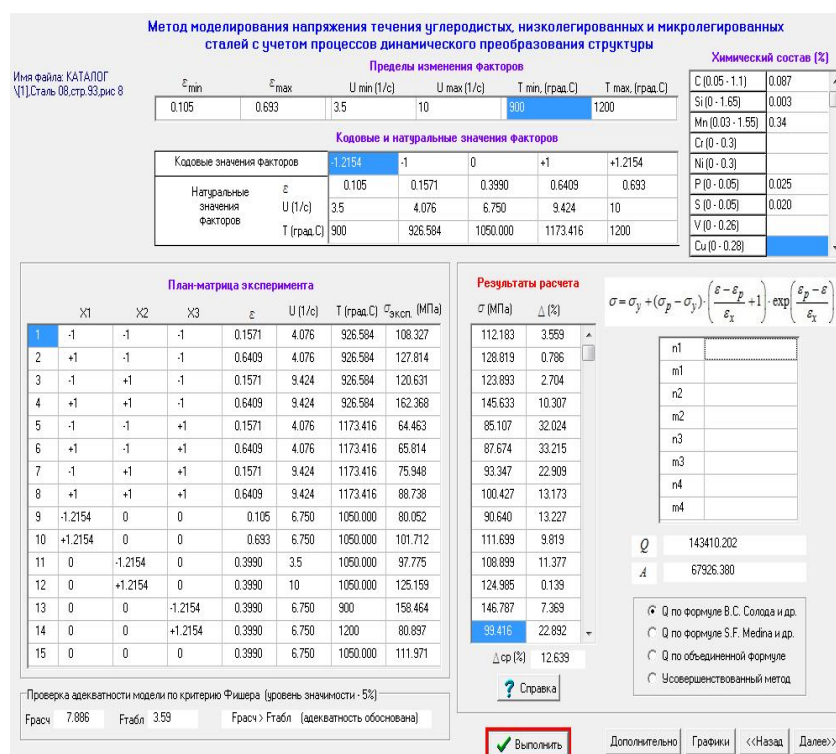


Рисунок 9 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 08 [6] на базе исходных констант

Таким образом, разработаны усовершенствованные метод и компьютерная программа расчёта уточнённых констант формул, определяющих термокинетические параметры в теории расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации как для отдельных марок сталей, так и для групп (до 25 марок сталей).

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что определение констант, входящих в формулы расчета термокинетических параметров, на базе больших групп марок сталей с широким диапазоном изменения состава химических элементов и с существенно отличающимися типами кривых течения металла не обеспечивает приемлемую точность расчетов напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации. При

этом средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным в отдельных случаях достигают 30 %.

На базе усовершенствованного метода и компьютерной программы выполнен расчёт уточнённых констант формул, определяющих термокинетические параметры для групп из двух марок сталей: 0,5C—0,2Si—0,68Mn, 0,06C—0,12Si—0,42Mn и трёх марок сталей: 45, 08, 55. При этом средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения металла по отношению к экспериментальным составили 4–10 %.

В дальнейшем наиболее целесообразно определение уточнённых констант, входящих в формулы расчета термокинетических параметров, на базе экспериментальных данных для отдельных марок сталей или для небольших групп марок сталей с подобными типами кривых течения металла.

Библиографический список

1. Яковченко, А. В. Метод уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла [Текст] / А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко, С. И. Кравцова, Н. И. Ивлева // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2022. — № 26 (69). — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ». — С. 29–39.
2. Солод, В. С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей [Текст] / В. С. Солод, Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин // Металл и литье Украины. — 2006. — № 7–8. — С. 52–56.
3. Saadatkia, S. Hot deformation behavior, dynamic recrystallization, and physically-based constitutive modeling of plain carbon steels [Text] / S. Saadatkia, H. Mirzadeha, J.-M. Cabrera // Materials Science and Engineering: A. — 2015. — Vol. 636. — P. 196–202.
4. Яковченко, А. В. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации [Текст] : учеб. пособ. / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, Н. И. Ивлева. — Донецк : ДонНТУ, 2018. — 197 с.
5. Yanagida, A. A novel approach to determine the kinetics for dynamic recrystallization by using the flow curve [Text] / A. Yanagida, J. Yanagimoto // Journal of Materials Processing Technology. — 2004. — Vol. 151. — Iss. 1–3. — P. 33–38.
6. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов [Текст] : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. — М. : Металлургия, 1976. — 488 с.
7. Зависимость напряжения течения стали 0,19C—0,20Si—0,40Mn, учитывающая при горячей прокатке процессы динамического преобразования структуры [Текст] / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, В. В. Пилипенко, Н. И. Ивлева // Вестник Донецкого национального технического университета. — 2020. — Том 19. — № 1. — С. 45–52.

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

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

Статья поступила в редакцию 19.05.2022.

**Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V., PhD in Engineering Denishchenko P. N.,
Kravtsova S. I. (DonSTI, Alchevsk, LPR, kravtsovsveta@gmail.com), Ivleva N. I. (DonNIIchermet,
Donetsk, DPR, ivl22@mail.ru)**

**IMPROVED METHOD AND SOFTWARE PROGRAM FOR DETERMINING THE REFINED
CONSTANTS OF FORMULAS FOR CALCULATING THERMOKINETIC PARAMETERS
FOR GROUPS OF STEEL GRADES**

An improved method and a software program for calculating the refined constants of formulas that determine the thermokinetic parameters in the theory of calculating the metal flow stress, considering the processes of dynamic transformation of its structure during hot plastic deformation, both for individual steel grades and for groups (up to 25 steel grades). The calculation of the refined constants of formulas determining the thermokinetic parameters for groups of two steel grades: 0,5 S—0,2Si—0,68Mn, 0,06S—0,12Si—0,42Mn and three steel grades: 45, 08, 55. At the same time, the average relative deviations of the calculated values of metal flow stress in relation to the experimental ones were 4–10 %.

Key words: *metal flow stress under hot plastic deformation, constants determining thermokinetic parameters, computer database of digital information about experimental metal flow stress curves, spline-interpolation of flow curves, software program.*

УДК 669.162.262

к.т.н. Русанов И. Ф.,
к.ф.-м.н. Русанова Н. И.,
к.т.н. Лебедев В. А.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, rusanova-2011@inbox.ru)

КОЛЕБАНИЯ СИТОВОГО СОСТАВА АГЛОМЕРАТА НА ВЫХОДЕ ИЗ БУНКЕРОВ И ИХ КОМПЕНСАЦИЯ В ДОМЕННОМ ПРОЦЕССЕ

Приведены результаты исследования изменения ситового состава скипового агломерата по мере опорожнения шихтовых бункеров. Установлено, что на выходе из бункеров генерируются среднечастотные колебания ситового состава агломерата, амплитуда которых тем больше, чем больше количество включенных в работу бункеров, а период равен времени их опорожнения.

В результате в первый полупериод работы бункеров средний размер куса ниже средней крупности агломерата в бункерах, а во второй — выше. Колебания ситового состава агломерата приводят к ухудшению газодинамических условий в верхней части доменной печи. Для компенсации колебаний ситового состава агломерата предложено вести плавку с переменным уровнем засыпи.

Ключевые слова: агломерат, бункера, ситовый состав агломерата, размер кусков агломерата, колебания крупности, газодинамические условия, переменный уровень засыпи.

Во многих исследованиях, проводимых в различных отраслях промышленности, отмечается, что при заполнении бункеров неоднородными по крупности сыпучими материалами их частицы имеют тенденцию к обособлению, т. е. к сегрегации по крупности. Степень развития сегрегации при этом, определяется не только ситовым составом материала, но и конструкцией бункеров и способом их заполнения.

В условиях доменного производства в результате проявления сегрегации агломерата (самого неоднородного по крупности материала доменной плавки) как при загрузке, так и выгрузке бункеров бункерной эстакады ситовый состав материала от одной загружаемой порции к другой может существенно отличаться.

Например, по данным авторов работы [1] в условиях Карагандинского металлургического комбината (ныне АО «АрселорМиттал Темиртау») содержание мелочи (фракции размером менее 5 мм) в агломерате отдельных подач в период проведения исследований изменялось от 2–4 до 18–20 %.

В результате аналогичных исследований на доменной печи № 6 Новолипецкого комбината (НЛМК) также установили, что и

при конвейерной подаче материалов в печь доза материала на конвейере имеет в продольном направлении неоднородный ситовый состав [2]. В головной и хвостовой части дозы отмечается повышенная концентрация мелких фракций. Разница в содержании фракции менее 5 мм по отношению к средней части достигала 13 % абс.

Исследования [1] и [2] проводились на печах одинакового объема, но с принципиально отличающимся оборудованием шихтоподачи и в различных шихтовых условиях доменной плавки. При этом в обоих случаях в начале и в конце (первые и последние подачи, головная и хвостовая часть дозы) порции материалов, равной объему одного или нескольких бункеров, наблюдается повышенный выход мелочи. Другие фракции также распределены неравномерно [2].

Приведенные данные свидетельствуют о развитии сегрегации шихтовых материалов при загрузке их в бункера и при последующем их опорожнении. В результате сегрегации материалов в выходном потоке генерируются среднечастотные колебания их ситового состава с периодом, равным времени полного опорожнения бункера или

группы бункеров. Вместе с тем данные авторов [1] и [2] не позволяют установить закономерности колебаний ситового состава материалов на выходе из бункеров по мере их опорожнения и оценить влияние этих колебаний на ход доменного процесса.

Поэтому на доменной печи объемом 3000 м³ Алчевского металлургического комбината, оборудованной транспортной подачей железорудных материалов в скипы, проведены исследования, целью которых являлось изучение колеблемости ситового состава агломерата на выходе из бункеров и ее влияния на ход доменного процесса.

Программой исследований предусматривались: загрузка агломерата в предварительно практически полностью опорожненные бункера, заполнение одного или двух бункеров перед их включением в работу на 90–95 %, отбор и рассев проб скипового агломерата с периодичностью 20–30 минут.

Масса одной пробы составляла около 200 кг. Рассев проб производился по стандартной методике.

В разное время было проведено четыре исследования: А и Г при выдаче агломерата из двух бункеров и Б и В — из одного. Во время проведения исследований ситовый состав загруженного в бункера агломерата существенно различался и имел обобщенные характеристики (средний размер кусков d_{cp} , среднеквадратичное отклонение размера кусков от среднего CKO и коэффициент вариации размера кусков ν), численные значения которых приведены в таблице 1.

При выдаче агломерата из двух бункеров в период А агломерат имел неоднородный ситовый состав ($\nu=1,01$), а в период Г — повышенную крупность ($d_{cp}=28,3$ мм). В периоды Б и В агломерат был достаточно однородным, но и наиболее мелким.

Анализ полученных данных показал, что по мере опорожнения бункеров наблюдаются значительные колебания ситового состава агломерата.

Таблица 1
Характеристики ситового состава загруженного в бункера агломерата

Период	d_{cp} , мм	CKO , мм	ν
А	16,2	16,1	0,99
Б	13,3	8,3	0,63
В	15,4	9,3	0,61
Г	28,3	21,1	0,75

При этом наиболее сильно изменяется в скиповом агломерате содержание мелких (менее 5 мм) и крупных (более 25 мм) фракций (рис. 1 и 2).

В случае, когда выдача агломерата производилась одновременно из двух бункеров, содержание мелких и крупных фракций в скиповом агломерате тесно коррелировано (коэффициент корреляции для периода А составил 0,88, а для периода Г — 0,92). При работе одного бункера связь между мелкими и крупными фракциями значительно слабее. Однако во всех случаях теснота связи между мелкими и крупными фракциями отрицательная и тем выше, чем крупнее агломерат.

Коэффициент корреляции между содержанием мелких и крупных фракций по всем пробам с содержанием средних фракций — не более 0,24.



Рисунок 1 Изменение содержания в пробах фракции размером менее 5 мм

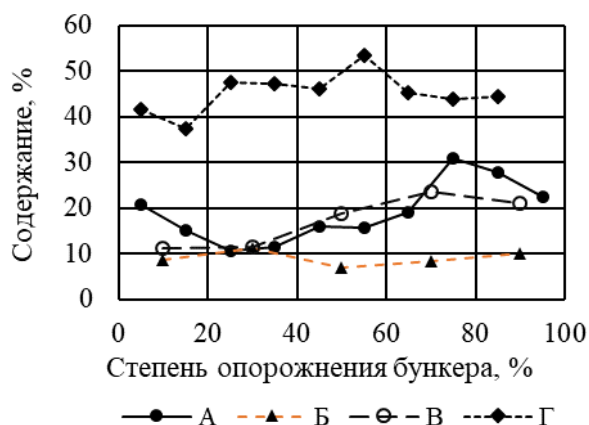


Рисунок 2 Изменение содержания в пробах фракции размером более 25 мм

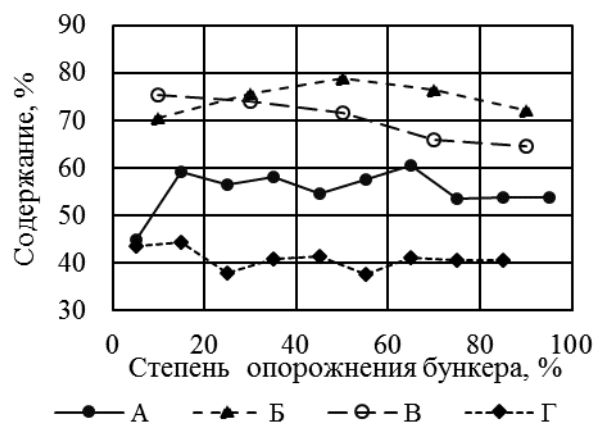


Рисунок 3 Изменение содержания в пробах фракции 10–25 мм

Степень развития сегрегации агломерата по крупности в бункерах и в процессе их опорожнения существенно зависит от ситового состава материала и от количества находящихся в работе бункеров. При этом очевидно, что чем больше бункеров одновременно включено в работу, тем больше амплитуда колебаний отдельных фракций. Так, содержание мелких фракций (менее 5 мм) в период исследования А изменялось в диапазоне от 15,5 мм до 34,2 мм при их содержании в загруженном в бункера агломерате, равном 25,8 %. Коэффициент вариации, характеризующий колеблемость мелких фракций в этот период, равнялся 0,25.

Существенной сегрегации подвержены и крупные фракции (рис. 2). Коэффициент вариации содержания фракции размером более 25 мм отдельных проб составил 0,33, а остальных фракций — не более 0,07 (рис. 3).

В меньшей степени сегрегации подвержен агломерат в периоды Б и В, когда его загрузка производилась из одного бункера. Колеблемость мелких фракций в эти периоды характеризуется коэффициентами вариации, равными 0,16 и 0,17 соответственно, а крупных — в среднем 0,22.

Примерно в такой же степени сегрегировал агломерат в период Г, когда его средняя крупность была максимальной, а состав был достаточно однороден.

Вычисленные в ходе обработки значения обобщенных характеристик ситового состава агломерата d_{cp} и v от одной пробы к другой существенно изменялись.

На рисунке 4 в качестве примера приведены графики изменения обобщенных характеристик ситового состава агломерата по мере опорожнения бункеров для двух периодов исследований А и В, когда выдача агломерата осуществлялась соответственно одновременно из двух и только из одного бункера.

Как следует из приведенных данных, изменение обобщенных характеристик ситового состава скипового агломерата по мере опорожнения бункеров тем существеннее, чем больше бункеров одновременно находится в работе. Последнее подтверждается и данными дисперсионного анализа. Если при работе одного бункера среднее квадратичное отклонение (СКО) средней крупности агломерата в подаче от d_{cp} агломерата партии составляло 0,5–1,5, то при работе двух бункеров оно возросло до 2,5–3,0. Средняя крупность агломерата партии также оказывает существенное влияние на величину колебаний крупности агломерата: чем крупнее агломерат, тем больше СКО среднего размера кусков.

Наряду с изменением крупности агломерата по мере опорожнения бункеров наблюдается и изменение его однородности.

При этом с увеличением крупности агломерата он становится более однородным по крупности. Однако при этом коэффициент вариации размера кусков изменяется в небольшом диапазоне и характеризуется СКО, равным 0,1.

Зависимость изменения среднего размера кусков агломерата по мере опорожнения бункеров в первом приближении описывается уравнением вида

$$d_i = d_{cp} + k \cdot n \cdot v \cdot \sin(-2\pi \cdot \frac{t}{T}), \quad (1)$$

где d_i — средний размер куска скипового агломерата на момент его загрузки от начала включения бункеров в работу t , мм; d_{cp} — средний размер куска агломерата партии, мм; n — количество работающих бункеров; v — коэффициент вариации размера кусков агломерата партии; T — полное время опорожнения бункеров; k — коэффициент масштаба. Коэффициент корреляции между средними размерами кусков агломерата, вычисленными по экспериментальным данным и по формуле (1), равен 0,86.

Процесс истечения материалов из бункеров является сложным и малоизученным. Общая схема истечения материалов из бункеров по существующим представлениям приведена Коротичем В. И. в работе [3].

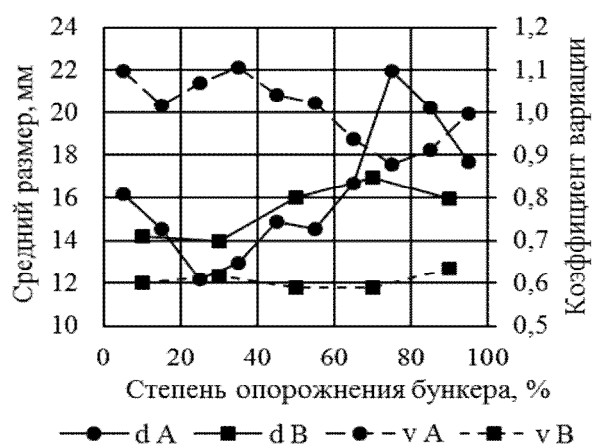


Рисунок 4 Изменение среднего размера кусков агломерата d и коэффициента вариации их размера v в периоды А и В

С учетом этих представлений изменение ситового состава агломерата и его обобщенных характеристик, очевидно, вызвано следующим.

При заполнении бункеров первые порции материала попадают непосредственно к выпускному отверстию и из-за малых поперечных размеров бункера в нижней его части и в прилегающих к горловине объемах сегрегация агломерата ограничена. Затем, по мере заполнения бункера, развивается сегрегация агломерата по откосам, направленным к стенкам бункера. В результате над выпускным отверстием бункера концентрируется мелкий агломерат, а у стен — крупный. При опорожнении бункера вначале выходит агломерат, не подвергшийся сегрегации, и его ситовый состав близок к среднему составу партии. Последующие порции агломерата обеднены крупными фракциями, так как начинается выход материала из эллипсоида, вытянутого вдоль вертикальной оси бункера. После опорожнения бункера на 30–40 % на поверхности материала образуется воронка, крупные куски начинают скатываться от стен к центру, и их содержание в скиповом агломерате возрастает. Когда же бункер становится почти пустым, у стен его остается в основном мелочь, которая и выходит в последнюю очередь.

В целом результаты проведенных исследований свидетельствуют о наличии существенных колебаний ситового состава скипового агломерата, которые сказываются на газодинамических условиях в верхней части доменной печи. Так, например, анализ режимных показателей доменной плавки в период А показал, что изменение перепада давления «середины печи — колошник» ($\Delta P_{верх}$) взаимосвязано с обобщенными характеристиками ситового состава агломерата: чем крупнее и однороднее агломерат, тем меньше $\Delta P_{верх}$. Теснота связи $\Delta P_{верх}$ с величиной $1/d_{cp}$ в этот период характеризовалась парным коэффициентом корреляции, равным 0,693, а с величиной v — 0,748. Полученные данные

хорошо согласуются с общими закономерностями влияния ситового состава железорудных материалов на газодинамическое сопротивление слоя, приведенными в работе [4].

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при опорожнении бункеров в выходном потоке агломерата генерируются значительные колебания ситового состава агломерата, которые приводят к изменению газодинамических условий в верхней части доменной печи.

Вместе с тем заслуживает внимания тот факт, что в первый полупериод работы бункеров (протяженностью $0,5 \cdot T$ — от момента их включения в работу до опорожнения наполовину) средняя крупность скипового агломерата на 5–10 % ниже, а во второй — настолько же выше, чем средняя крупность агломерата, загруженного в бункер (табл. 2).

Таблица 2

Ситовый состав скипового агломерата и его обобщенные характеристики

$\frac{T}{2}$	Фракция, мм	Содержание, %			
		А	Б	В	Г
Первый	<3	15,1	7,0	4,0	7,6
	3–5	15,5	9,2	8,7	6,7
	5–10	30,3	31,8	30,5	12,3
	10–25	24,5	43,2	43,2	29,3
	>25	14,6	8,8	13,6	44,4
	d_{cp}	14,1	12,5	13,9	27,5
	ν	1,10	0,62	0,57	0,80
Второй	<3	10,4	6,4	4,1	6,2
	3–5	10,6	9,2	7,5	6,3
	5–10	27,8	32,5	26,9	12,7
	10–25	28,0	43,3	40,3	27,2
	>25	23,2	8,5	21,2	47,6
	d_{cp}	18,2	12,5	15,7	28,9
	ν	0,90	0,60	0,61	0,88

Во время проведения исследований лишь в период Б средняя крупность агломерата по полупериодам оказалась одинаковой. Очевидно, это вызвано тем, что перед проведением исследований бункер не был полностью опорожнен. Одновременно с изменением средней крупности во втором полупериоде работы бункеров ситовый состав агломерата характеризуется, как правило, более низким коэффициентом вариации размера кусков.

Учитывая установленные в работе [5] закономерности распределения неоднородного сыпучего материала по откосу, следует ожидать, что наблюдаемые особенности формирования ситового состава скипового агломерата будут вызывать и перераспределение газового потока по радиусу печи. Согласно проведенному анализу установлено, что при загрузке материала с уменьшенной крупностью его сегрегация к оси печи уменьшается, а к кладке увеличивается. В результате такого изменения сегрегации кусков агломерата периферийный поток газов усиливается, а центральный — ослабевает. При загрузке в печь материала повышенной крупности, наоборот, сегрегация увеличивается к оси печи, а к кладке — уменьшается, и периферийный поток ослабевает, а центральный усиливается.

Такое влияние ситового состава скипового агломерата на сегрегацию его по радиусу колошника и распределение газового потока в печи может быть скомпенсировано изменением условий формирования поверхности засыпи на колошнике. Поэтому для стабилизации распределения газового потока по радиусу доменной печи плавку предложено вести с переменным уровнем засыпи.

Опыт работы доменных печей с переменным уровнем засыпи показывает, что циклическое его изменение приводит к «дрейфу» местоположения гребней материалов, и их мелкие фракции рассредоточиваются по радиусу и окружности колошника. В результате более равномерно-

го распределения мелочи повышается степень использования газа, что приводит к снижению расхода кокса. Однако это справедливо только тогда, когда есть соответствие между ситовым составом материалов и условиями работы печи.

В соответствии с описанными выше закономерностями колебаний ситового состава агломерата на выходе из бункеров работа на печи должна быть организована следующим образом.

Перед переходом на работу с переменным уровнем засыпи планируемые к включению в работу бункера заполняются агломератом на 90–95 %.

В первый полупериод работы бункеров (примерно до их опорожнения наполовину) целесообразно уровень засыпи увеличивать на 0,25–0,50 м, а во второй — на столько же уменьшать его от основного уровня засыпи, на котором печь обычно работает. Величина изменения уровня засыпи устанавливается в зависимости от количества бункеров, из которых производится выдача агломерата: чем их больше, тем величина изменения уровня засыпи больше. При переходе на новую группу бункеров изменение уровня засыпи повторяется в той же последовательности.

Для оценки предложенной технологии ведения доменной плавки на доменной печи объемом 3000 м³ АМК была проведена десятидневная опытная плавка с переменным уровнем засыпи шихтовых материалов на колошнике. Во время проведения опытной плавки выдача агломерата производилась из четырех бункеров одной стороны шихтоподачи. Емкость бункеров обеспечивала загрузку 20 подач. Первые 8 подач загружались в печь при уровне засыпи 1,75 м, а последующие 12 — при уровне засыпи 1,25 м. Такая организация загрузки являлась оптимальной в условиях работы печи.

Во время опытной плавки каких-либо отклонений от нормального хода процесса не наблюдалось. Напротив, как показывает анализ, во время опытной плавки с пере-

менным уровнем засыпи существенно возросла интенсивность плавки, и приведенная к базовому периоду производительность в опытный период возросла на 1,7 %, а удельный расход кокса снизился более чем на 0,7 %.

Это явилось следствием улучшения радиального распределения газового потока (рис. 5) и увеличения степени использования CO на 0,5 %.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при прохождении агломерата через бункера в выходном потоке генерируются значительные колебания его ситового состава. При этом в первый полупериод опорожнения одного или группы бункеров, предварительно заполненных на 90–95 %, средняя крупность агломерата на 5–10 % ниже, а во второй — на столько же выше средней крупности агломерата в партии. Такие колебания оказывают влияние на ход доменного процесса.

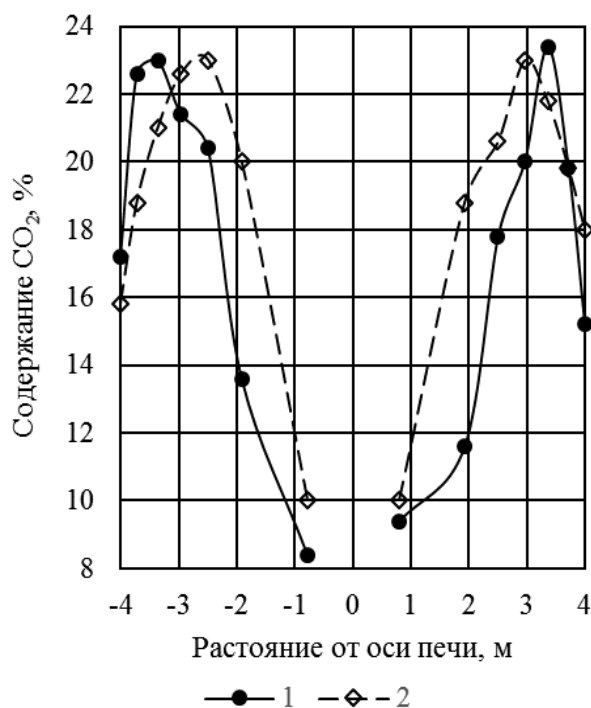


Рисунок 5 Распределение содержания CO₂ в колошниковом газе по радиусу печи в базовом (1) и в опытном (2) периодах

Для улучшения распределения материалов и газов по радиусу доменной печи при наличии колебаний ситового состава загружаемого в печь агломерата уровень засыпи следует менять в соответствии с высотой бункеров; например, в первый полупериод опорожнения бункеров уровень засыпи понижать на 0,25–0,50 м, а во второй — на столько же

увеличивать относительно номинальных его значений.

При этом производительность печи возрастает на 1,5–2,0 %, а удельный расход кокса снижается более чем на 0,7 %.

В дальнейшем планируется провести дополнительные исследования для разработки алгоритмов учета колеблемости ситового состава скипового агломерата.

Библиографический список

1. Пути интенсификации хода доменных печей КарМК большого объема при их работе с высоким выходом шлака [Текст] / Г. Л. Цымбал, В. А. Мирко, В. В. Емушинцев и др. // *Сталь*. — 1980. — № 6. — С. 459–465.
2. Неравномерность гранулометрического состава дозы материала на конвейере доменной печи: совершенствование технологии доменного производства [Текст] / А. М. Гавриков, Э. А. Шепетовский, Н. Г. Иванча, Е. А. Клоцман // *Тематический сборник научных трудов*. — М.: *Металлургия*, 1988. — С. 35–38.
3. Коротич, В. И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке [Текст] / В. И. Коротич. — М.: *Металлургия*, 1978. — 208 с.
4. Русанов, И. Ф. Влияние гранулометрического состава полифракционного сыпучего материала на газодинамическое сопротивление слоя [Текст] / И. Ф. Русанов, Н. И. Русанова // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Алчевск: *ДонГТУ*, 2016. — № 47. — С. 69–73.
5. Русанов, И. Ф. Влияние условий формирования откоса на сегрегацию материалов по крупности на его поверхности [Текст] / И. Ф. Русанов, Н. И. Русанова // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — № 56. — С. 27–33.

© Русанов И. Ф.

© Русанова Н. И.

© Лебедев В. А.

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

Статья поступила в редакцию 27.05.2022.

PhD in Engineering Rusanov I. F., PhD in Physics and Mathematics Rusanova N. I., PhD in Engineering Lebedev V. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR, rusanova-2011@inbox.ru)

FLUCTUATIONS IN THE SIEVE COMPOSITION OF SINTER ON EXIT FROM THE BUNKERS AND THEIR COMPENSATION IN THE BLAST FURNACE PROCESS

There have been given the results of the study of changes in the sieve composition of skip sinter as the charge bunkers are emptied. It is determined that on exit from the bunkers, the medium-frequency fluctuations of the sieve composition of sinter are generated, the amplitude of which is greater than the greater number of bunkers included in the operation, and the period is equal to the time of their emptying.

As a result, in the first half-life of bunkers, the average size of piece is lower than the average size of sinter in the bunkers, and in the second — higher. Fluctuations in the sieve composition of sinter lead to deterioration of gas dynamic conditions in the upper part of the blast furnace. To compensate the fluctuations in the sieve composition of sinter, it is proposed to conduct melting with a variable level of stock.

Key words: sinter, bunkers, sieve composition of sinter, size of sinter pieces, fluctuations in size, gas dynamic conditions, variable level of stock.

УДК 669.18.04:669.89

*к.т.н. Куберский С. В.,
к.т.н. Проценко М. Ю.,
Воронько М. И.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА МЕТОДА ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

Выполнен анализ основных затрат электроэнергии при использовании электрической дуги в технологиях выплавки и внепечной обработки стали. Составлен энергетический баланс процесса дугового глубинного восстановления (ДГВ) кремния из песка в железоуглеродистый расплав. Показана более высокая эффективность нагрева расплава при ДГВ в сравнении с агрегатом «ковш-печь».

Ключевые слова: *электродуговая печь, агрегат «ковш-печь», дуговое глубинное восстановление, кремний, песок, электрическая дуга, энергетический баланс, нагрев.*

В процессе создания новых и модернизации существующих конструкций, машин и механизмов постоянно возрастают требования к качеству используемых материалов. Согласно данным ассоциации «Русская сталь», мировое производство стали в 2021 г. превысило 1,9 млрд тонн, из которых более 70 % было выплавлено в конвертерах [1]. Доля выплавки электростали снизилась на 2 % и составила 26 %. Основное снижение доли электростали произошло за счет Китая, в ЕС доля электростали увеличилась на 2 % — до 42 %, а в Российской Федерации (РФ) снизилась на 1 % — до 32 %. Тем не менее РФ остается одним из немногих основных производителей электростали с позитивной динамикой роста ее объемов. С 2006 по 2020 г. доля электростали, произведенной в РФ, увеличилась более чем на 10 %.

Практика мировой металлургии свидетельствует о том, что для получения традиционной высококачественной конвертерной или электросталеплавильной металлопродукции из чёрных металлов необходимо наличие в производственной технологической схеме внепечной обработки металла, использование которой позволяет обеспечить требуемый химический состав и температуру металла перед разливкой. Перенос раскисления-легирования, де-

сульфурации, гомогенизации и других технологических операций в ковш позволяет повысить производительность плавильного агрегата и снизить себестоимость продукции. Наиболее широкое применение для внепечной обработки стали получили агрегаты «ковш-печь» (АКП).

Традиционно при раскислении-легировании чёрных металлов используют дорогостоящие ферросплавы, производство которых является энерго- и ресурсоёмким.

В процессах выплавки стали в электродуговых печах, обработки в АКП и при производстве ферросплавов в качестве источника тепла используется электрическая дуга.

Поэтому увеличение объемов производства электростали неразрывно связано с ростом затрат электроэнергии на ее выплавку и внепечную обработку в АКП, а также получение ферросплавов и лигатур, используемых для обеспечения необходимого уровня физико-химических свойств стали и сплавов.

Одними из основных показателей, определяющих конкурентоспособность металлопродукции, получаемой вышеописанными технологиями, являются ее себестоимость и качество. Кроме того, в современных условиях важной проблемой металлургического производства является повышение его энергоэффективности. Раз-

работка и внедрение технологий, позволяющих затрачивать меньшее количество энергоносителей и сырьевых материалов, особенно при использовании в качестве шихты отходов производства или вторичных материалов, является достаточно перспективным направлением ввиду значительного снижения затрат на производство черных металлов.

Решение данной проблемы может быть достигнуто в результате усовершенствования существующих технологий либо разработки новых.

В работе [2] предложена технология переработки отходов ферросплавного производства с использованием метода дугового глубинного восстановления (ДГВ) полезных компонентов, входящих в их состав, непосредственно в железоуглеродистый расплав. Основная сущность метода ДГВ заключается в восстановлении полезных элементов из определенного вида сырья в зоне электрической дуги с использованием различных восстановителей и связующих.

Цель данной работы предусматривала анализ затрат и эффективности использования электрической энергии в различных электродуговых технологиях.

Объект исследования — процесс дугового нагрева.

Предмет исследования — затраты электроэнергии на реализацию технологических процессов и их отдельных стадий.

Методика исследования. При проведении исследований использовали стандартные методики подготовки сырья, измерения температуры, отбора и подготовки проб для химического анализа состава чугуна. Для оценки затрат электроэнергии использовались различные методы их определения, основанные на расчетах и регистрации электрических параметров процесса. Полученные результаты экспериментальных данных обрабатывались на ПЭВМ с использованием стандартного пакета программ Microsoft Excel.

В современных электродуговых сталеплавильных печах наряду с основными

техническими показателями большое влияние на энергетическую эффективность оказывает коэффициент полезного действия печи. Его значение зависит от количества и видов энергетических ресурсов, используемых в процессе ведения плавки. Для малотоннажных печей, которые используют в качестве энергоносителя исключительно электрическую энергию, КПД складывается из собственного КПД печи и затрат на производство и передачу электроэнергии к ней. Для печей больших емкостей, в которых помимо электрической энергии используется природный газ и кислород, также необходимо учитывать затраты на их производство и транспортировку. Таким образом, с увеличением объема печи и количества энергетических ресурсов общий КПД снижается. В современных сверхмощных дуговых сталеплавильных печах значение фактического КПД составляет 55–60 % при высоком удельном расходе электроэнергии в процессе плавки стали (табл. 1) [3].

Таблица 1
Удельный расход электроэнергии при производстве электростали*, кВт·ч/т стали

Предприятие	2019 г.	2020 г.
Россия (ЧМ)*	458,1	452,0
ММК	434,9	460,6
ЧерМК	279,3	277,3
Уральская сталь	150,9	167,2
ЧелМК	263,8	264,0
Надеждинский МЗ	318,6	296,3
Ижсталь	516,8	509,2
Златоустовский МЗ	820,6	898,4
ОЭМК	637,4	646,8
СТЗ	460,9	459,4
ТагМЗ	657,6	580,7
ВМЗ	419,3	419,3
НЛМК-Калуга	369,4	389,4
ПНТЗ	410,4	404,1
Ашинский МЗ	597,5	561,8
Абинский ЭМЗ	474,2	394,5

*По учетному кругу предприятий.

Такое значение фактического КПД обусловлено конструкцией и технологическим режимом работы печи. Потери энергии в ее рабочем пространстве (с отходящим газом, в водоохлаждаемых панелях и своде) в значительной степени зависят от ее конструкции [4].

Оценка эффективности производства электростали осуществляется по трем параметрам: производительность, качество, стоимость. В себестоимости электростали значительную часть занимают расходы по переделу (до 60 %), которые, в свою очередь, распределяются следующим образом: электроэнергия — 43,1 %; электроды — 14,2 %; огнеупоры — 13,3 %; транспортные расходы — 11,7 %; обслуживание — 14,7 %; издержки производства — 2,5 % [5].

Одной из важных характеристик работы АКП является удельный расход электроэнергии. В таблице 2 приведены основные электрические характеристики агрегатов «ковш-печь» некоторых металлургических предприятий [6].

Из таблицы 2 следует, что удельный расход электроэнергии изменяется от 20 до 80 кВт·ч/т стали, а если учитывать только

нагрев 1 т стали, средние затраты электроэнергии составляют 30–40 кВт·ч/°С. При этом на некоторых предприятиях указывается расход электроэнергии только на подогрев стали, на других — общий расход.

Первое место в РФ по объемам производства занимают кремнистые ферросплавы. В основном, несмотря на широкий сортимент ферросилиция марок ФС20–ФС90, значительную долю объемов выплавки в ферросплавных печах составляют сплавы ФС45–ФС75. Ферросилиций ФС75 наиболее востребован не только для внутреннего рынка потребления, но и для экспорта.

Углеродотермический процесс выплавки в ферросплавных печах является весьма материало- и энергоемким. Удельный расход электроэнергии на выплавку ферросилиция марок ФС45–ФС75 находится в пределах от 4650–4900 до 8600–9000 кВт·ч/т и более, что почти в 10–20 раз выше, чем при выплавке 1 т стали в дуговой печи. Примерные основные затраты на выплавку 1 т ферросилиция составляют: рудное сырье — 5–15 %; электроэнергия — 43–55 %; углеродистый восстановитель — 20–25 %.

Таблица 2

Основные характеристики агрегатов «ковш-печь»

Параметры	Фирма производитель агрегата «ковш-печь»							
	ASEA-SKF (Швеция)	Fukhs (Германия)	Krupp (Германия)	Daniely (Италия) (ММЗ-ИСТИЛ)	BSW (Англия)	НКМЗ (Украина) Филиал № 2 «ЕМЗ» ООО «ЮГМК»	АКОС-125 (Россия)	ММЗ (Молдавия)
Емкость ковша, т	90–130	110	120	120	86	145	100–125	100
Мощность трансформатора, МВА	12–15	15	18–21	18	12	25	16	18
Скорость нагрева металла, °С/мин	4–6	4	4,3	4,6	3	4,5	3–5	4
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	80	33	30	30–40	20	30–40	25–40	-
Продолжительность обработки или нагрева, мин	60–180 (общая)	35–45 (общая)	40–50 (нагрев)	60–120 (общая) 20–30 (нагрев)	20–25 (нагрев)	40–60 (общая)	25–50 (общая)	45–50 (общая)

Теоретический расход электроэнергии на химические реакции из расчета получения 1 т сплава составляет [7]: 2520 кВт·ч/т для ФС45 и 4210 кВт·ч/т для ФС75. Фактические удельные расходы электроэнергии на выплавку ферросилиция углеродотермическим процессом в рудно-восстановительной электропечи практически в 2 раза выше [8]. В таблице 3 представлены технологические и энергетические параметры выплавки ферросилиция марок ФС20–ФС65 [9].

Из данных таблицы 3 следует, что тепловой КПД ферросплавной электропечи при выплавке ферросилиция марок ФС20–ФС65 составляет 46,1–47,4 % и значительно влияет на удельный расход электроэнергии. Это обусловлено основной долей тепловых потерь через колошник печи с отходящими газами и излучением, несмотря на то, что процесс выплавки происходит в реакционной зоне под слоем шихты с закрытой дугой.

При проведении серии экспериментов по ДГВ марганца и кремния из металлургических отходов (шлак от производства силико-марганца) для легирования чугуна затраты на электроэнергию составили 43–66 % (среднее 55,6 %) от стоимости внепечной обработки, что свидетельствует о достаточно высокой конкурентоспособности предложенного способа [2]. Такой вывод авторами работы [10] был сделан на основании анализа калькуляций себестоимости процесса производства марганцевых и кремниевых ферросплавов. При ДГВ доля затрат на шихтовые материалы в себестоимости не превышает 10÷15 % (для кремниевых и марганцевых ферросплавов 30÷40 %). Поэтому процесс будет рентабельным, если затраты на электроэнергию будут находиться в пределах 55÷70 %.

Новым направлением исследований по усовершенствованию процесса ДГВ является разработка аналогичной технологии по извлечению кремния из песка, в котором содержание кремнезема может достигать 97 % [11].

До настоящего времени затраты электроэнергии для этого способа не были проанализированы ввиду его относительной но-

визны. Анализ данных затрат является актуальным, поскольку их величина и ее доля при таком способе внепечной обработки должны быть достаточно велики, о чем свидетельствуют затраты электроэнергии на производство кремнистых ферросплавов.

Для анализа затрат электроэнергии на ДГВ кремния из песка в лабораторных условиях была проведена серия экспериментов по обработке чугуна. Обработку чугуна производили в индукционной сталеплавильной тигельной печи ёмкостью 60 кг (ИСТ–0,06) с использованием источника питания ТИР-630. Для исследования затрат электроэнергии были изготовлены рудно-восстановительные блоки (РВБ) Ø50–55 мм. При изготовлении РВБ в качестве основного рудного сырья для рудно-восстановительной смеси (РВС) использовали песок (44,85–66,20 %), а в качестве связующего — жидкое стекло (ж.с.) (7–15 %), цемент (9,09 %) и каменноугольный пек (к.п.) (10–27 %). Для отдельных блоков использовали комбинацию ж.с. и к.п. (15 % и 10 % соответственно). В качестве восстановителя использовали кокс (14,13–28,58 %), количество которого рассчитывали по стехиометрии реакций восстановления общего кремния углеродом. РВБ были снабжены комбинированными электродами, состоящими из стальной трубки Ø18 мм, набитой внутри электродной смесью (MgO — 11,1 %, графит — 71,1 % и к.п. — 17,8 %). Обработка железоуглеродистого расплава производилась при начальной температуре 1465–1580 °С.

Основные технологические параметры и энергетические затраты при внепечной обработке железоуглеродистого расплава методом ДГВ кремния с использованием различных РВБ приведены в таблице 4.

Для регистрации энергетических затрат внепечной обработки железоуглеродистого расплава методом ДГВ кремния была использована схема на основе двух однофазных прямоточных счетчиков типа СО-И449, класса точности 2 [12]. Точность измерений при использовании данной схемы составляла ~2,1 %.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 3

Основные параметры выплавки ферросилиция

Параметры	Марка ферросилиция			
	ФС20	ФС25	ФС45	ФС65
Мощность, МВ·А	21,5	20,1	21,8	20,8
Электрический КПД, %	88,9	89,6	87,1	87,5
Базовое содержание Si в сплаве, %	20,0	25,0	45,0	65,0
Расход шихты на 1 баз. т сплава, кг:				
– кварцита	370	552	1015	1930
– коксика	200	280	438	845
– железной стружки	810	780	558	250
Извлечение Si в сплав	0,943	0,965	0,940	0,921
Тепловой КПД, %	47,4	46,7	47,2	46,1
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	2185	2750	4880	7410

Таблица 4

Основные параметры обработки металла методом ДГВ кремния из песка

№ РВБ	Связка в РВС	Масса металла, кг	Время обработки, с	Мощность, кВт	Затраты электроэнергии, кВт·ч	Восстановление Si, %
1	ж. с.	34,80	241	14,8	0,710	36,19
2	ж. с.	34,60	321	13,74	0,924	42,44
3	ж. с.	31,00	530	8,823	1,299	21,87
4	к. п.	39,80	201	13,4	0,802	81,74
5	к. п.	44,89	406	11,25	1,257	79,10
6	цемент	44,69	520	10,53	2,102	23,04
7	цемент	49,89	463	13,71	1,473	37,28
8	к. п.	49,73	397	11,87	1,242	87,72
9	ж. с.+к. п.	45,00	408	10,26	1,304	68,56
10	ж. с.+к. п.	40,00	648	10,55	1,819	85,54
11*	ж. с.+к. п.*	39,85	394	9,293	1,326	65,37

*Борная кислота 3 %.

Кроме того, был использован расчетный метод определения энергетических затрат процесса ДГВ по методике, представленной в работе [2]. Результаты расчета затрат электроэнергии на процесс ДГВ кремния из песка представлены в таблице 5.

При сжигании блоков № 1, 2, 4 и 7 наблюдалось сильное остывание металла в процессе обработки; при этом тепла от горения электрической дуги было недостаточно для компенсации тепловых потерь, имеющих место при протекании восстановительных процессов, а также охлаждении металла, находящегося в тигле индукционной печи (имеющем водяное охлаждение), через футеровку и с зеркала расплава. Кроме того, при обработке блоками № 1, 2 и 7 не обеспечивалось синхронное расходование всех их кон-

структивных элементов, разрушалась каверна в торцевой части и дуга практически не заглублялась в шлак и расплав, что значительно ухудшало эффективность дугового нагрева. РВС блока № 4 в ходе горения практически не расходовалась. Обработка расплава блоками 3, 5, 6, 8–11 характеризовалась стабильным горением и синхронным расходом с топливом, а средние затраты электроэнергии на нагрев 1 т чугуна методом ДГВ кремния составили 13,375 кВт·ч/°С, что более чем в 2 раза меньше аналогичных затрат электроэнергии (~35 кВт·ч/°С), характерных для нагрева железоуглеродистого расплава в АКП. Также необходимо отметить, что расходной электроэнергии было достаточно не только для компенсации тепловых потерь, но и для дополнительного подогрева металла.

Таблица 5

Баланс затрат электроэнергии на процесс ДГВ кремния из песка

№ РВБ	Расчетные затраты электроэнергии:														Общие затраты по счетчику, кВт·ч		
	нагрев РВС		распл. РВС		реакции восст. Si		нагрев и распл. ст. трубки КЭ		нагрев ЭС		нагрев металла		тепло с охлаждающей водой			общие затраты	
	кВт·ч	%	кВт·ч	%	кВт·ч	%	кВт·ч	%	кВт·ч	%	кВт·ч	%	кВт·ч	%		кВт·ч	%
3	0,323	25,70	0,032	2,52	0,316	25,16	0,097	7,71	0,014	1,14	0,387	30,83	0,087	6,93	1,255	100	1,299
5	0,081	7,25	0,010	0,89	0,299	26,59	0,054	4,78	0,008	0,72	0,515	45,80	0,157	13,96	1,124	100	1,257
6	0,345	16,80	0,034	1,64	0,255	12,43	0,063	3,05	0,009	0,46	0,952	46,39	0,395	19,25	2,052	100	2,102
8	0,116	10,46	0,014	1,29	0,473	42,58	0,054	4,84	0,008	0,73	0,354	31,83	0,092	8,27	1,112	100	1,242
9	0,138	11,31	0,014	1,17	0,336	27,58	0,041	3,36	0,006	0,50	0,443	36,31	0,241	19,76	1,220	100	1,304
10	0,116	6,28	0,012	0,65	0,354	19,10	0,065	3,53	0,010	0,52	0,969	52,31	0,326	17,60	1,852	100	1,819
11	0,081	8,95	0,008	0,93	0,189	20,81	0,051	5,56	0,007	0,82	0,286	31,42	0,287	31,53	0,910	100	1,326

Анализ данных, представленных в таблице 5, свидетельствует о том, что на нагрев металла в среднем затрачивается около 40 % электроэнергии, расходуемой на процесс ДГВ.

Ввиду больших затрат электроэнергии на нагрев металла при обработке блоками № 1 и 2 и значительного превышения полученных расчетных значений ее расхода над фактическими эти результаты не использовались в оценке энергетического баланса для проведенной серии экспериментов.

Довольно хорошие показатели степени восстановления кремния (65–85 %) получены при сжигании блоков с использованием комбинации связки ж. с. и к. п. 15 % и 10 % соответственно. Добавка 3 % борной кислоты в блок № 11 не обеспечила ожидаемых результатов по снижению температуры плавления РВС и увеличению степени восстановления кремния из песка. Поэтому в дальнейшем предполагается отказаться от добавки борной кислоты ввиду повышения себестоимости обработки и негативного влияния этой присадки на стойкость футеровки.

Библиографический список

1. Официальный сайт ассоциации «Русская сталь» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.russtal.ru>.
2. Проценко, М. Ю. Разработка ресурсосберегающей технологии дугового глубинного восстановления марганца из шлака силикомарганца в железоуглеродистые расплавы [Текст] :

дис. ... канд. техн. Наук : 05.16.02 / Проценко Михаил Юрьевич ; ДонГТУ. — Лисичанск, 2017. — 191 с.

3. Основные показатели работы черной металлургии России в 2020 г. [Текст] / В. В. Катунин, Н. Г. Зиновьева, И. М. Иванова, Т. М. Петракова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2021. — Т. 77. — № 4. — С. 367–392.

4. Корнилов, Г. П. Анализ фактического КПД электродуговой сталеплавильной печи [Текст] / Г. П. Корнилов, П. А. Шулепов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия : Энергетика. — 2017. — Т. 17. — № 4. — С. 33–38.

5. Журавлев, А. А. Расчеты материальных и энергетических балансов при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах [Текст] : учебно-методическое пособие / А. А. Журавлев, В. Ф. Мысик, А. В. Жданов ; Мин. обр. и науки РФ, Уральский федеральный университет. — Екатеринбург : ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», 2016. — 128 с.

6. Дюдкин, Д. А. Современная технология производства стали [Текст] / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко. — М. : Теплотехник, 2007. — 528 с.

7. Щедровицкий, Я. С. Высокремнистые ферросплавы [Текст] / Я. С. Щедровицкий. — Свердловск : Металлургиздат, 1961. — 256 с.

8. Емлин, Б. И. Справочник по электротермическим процессам [Текст] / Б. И. Емлин, М. И. Гасик. — М. : Металлургия, 1978. — 288 с.

9. Дашевский, В. Я. Ферросплавы: теория и технология [Текст] / В. Я. Дашевский. — М. : Издательский дом МИСиС, 2014. — 362 с.

10. Проценко, М. Ю. Сравнение эффективности легирования металла ферросплавами и методом дугового глубинного восстановления [Текст] / М. Ю. Проценко, С. В. Куберский, В. С. Эссельбах // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — Вып. № 35. — С. 211–220.

11. Использование метода дугового глубинного восстановления для извлечения кремния из песка в железоуглеродистые расплавы [Текст] / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, М. И. Воронько, И. А. Белан // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. 14 (57). — С. 37–45.

12. Усовершенствование методики определения энергетических затрат процесса дугового глубинного восстановления [Текст] / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, М. И. Воронько, В. С. Заведия // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — Вып. № 19 (62). — С. 61–66.

© Куберский С. В.

© Проценко М. Ю.

© Воронько М. И.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В.,
зам. начальника ЦЛК Филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» Тарасовым В. Н.**

Статья поступила в редакцию 01.06.2022.

PhD in Engineering Kuberskiy S. V., PhD in Engineering Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I.
(DonSTI, Alchevsk, LPR, shelengeer@mail.ru)

ANALYZING THE ENERGY BALANCE OF THE ARC DEPTH SILICON REDUCTION METHOD

The analysis of the main energy costs while using an electric arc in the technology of smelting and secondary steel making is carried out. The energy balance of process of the arc depth silicon reduction (ADR) from sand to an iron-carbon liquid-alloy has been compiled. The higher reheating efficiency of the liquid-alloy during ADR is shown in comparison with the ladle-furnace.

Key words: electric-arc furnace, ladle-furnace, arc depth reduction, silicon, sand, electric arc, energy balance, reheating.

**СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**

**CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE**

УДК 69.057.43

к.т.н. Будзило Е. Е.,
Збицкая В. В.

(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, ki1ri1ch@mail.ru)

К ВОПРОСУ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДОЗАЩИТЫ ОТКРЫТЫХ СТЫКОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ, СКЛАДСКИХ ПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

В данной работе выполнен анализ существующих вариантов устройства открытых стыков, разработан вариант водозащиты с использованием упругой прокладки в качестве герметизирующего материала. Исследованиями доказано, что данный вариант устройства наружного стыка позволяет надежно загерметизировать вертикальный стык между панелями здания, причем с уменьшением диаметра паза и увеличением толщины ленты возрастает давление на стенку канала, создаваемое прокладкой.

Ключевые слова: конструкция открытого стыка, водозащита, герметизация, упругая прокладка, устье стыка, панельное здание.

Эксплуатационная надежность производственных, сельскохозяйственных, складских панельных зданий в значительной мере зависит от качества герметизации стыков. Получившие широкое распространение конструкции закрытых стыков с применением «мокрых» процессов не всегда обеспечивают достаточную водозащиту стыковых соединений.

Учитывая, что уровень тепловой защиты в производственных, сельскохозяйственных, складских зданиях не так жестко регламентируется, что в первую очередь связано с характером их эксплуатации, это позволяет использовать в них открытые стыки, в которых водонепроницаемость обеспечивается конструктивными мероприятиями [1].

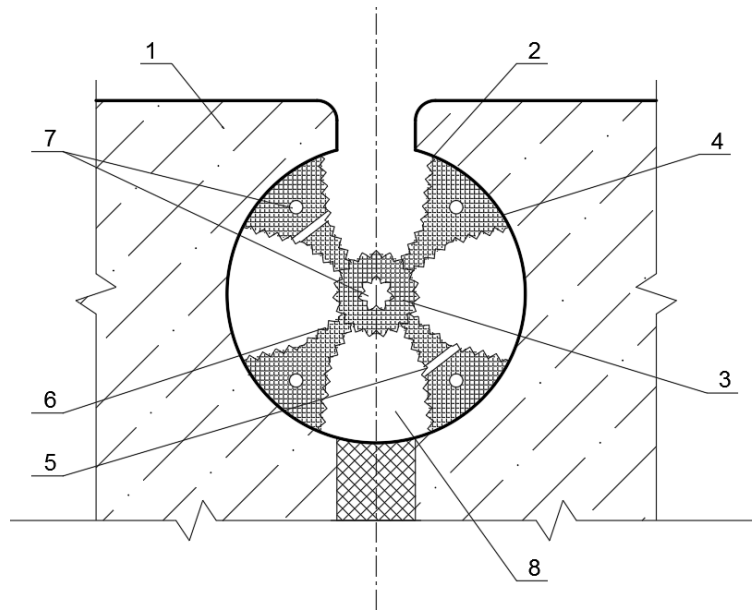
Наибольшее распространение в нашем регионе получили открытые стыки с водоотбойными элементами (серии П 4.9 Д, 119). Однако при этом стык имеет сложную конфигурацию устья, что приводит к его повреждению при распалубке панелей, их транспортировке и монтаже. В результате возникает необходимость в ремонте кромок панелей, что удорожает строительство, а качество герметизации ухудшается. Внедрение данного варианта устройства стыков в производственных, сельскохозяйст-

венных, складских зданиях также не позволит добиться надежной водозащиты в них.

Применение открытых стыков с несложной конфигурацией устья и использование водоотбойных элементов приводит к упрощению их устройства, не ухудшая при этом эксплуатационных качеств. Именно такими преимуществами обладает конструкция открытого стыка [2], включающая установленную в продольные пазы эластичную профилированную прокладку крестообразной формы с утолщенными на концах крыльями периодического сечения (рис. 1).

При воздействии на стык косого дождя с ветром возникает разность давлений воздуха снаружи и внутри стыка, однако наличие в крыльях прокладки отверстий способствует его выравниванию. Это исключает подсос дождевой воды. В случае просачивания незначительной части воды в заднюю камеру из-за отсутствия перепада давления она стекает по продольным гофрам.

Однако, несмотря на ряд положительных свойств данной конструкции, ей присущи и недостатки, обусловленные сложностью изготовления прокладок. Последние получают методом экструзии, причем совместить процесс их производства с перфорацией трудно, так как крылья размещены в двух плоскостях.



1 — наружные стеновые панели; 2 — продольные пазы; 3 — эластичная профильная прокладка;
4 — крылья; 5 — отверстия; 6 — продольные гофры; 7 — продольные каналы;
8 — декомпрессионные камеры

Рисунок 1 Герметизация вертикального стыка наружных стеновых панелей при помощи прокладки крестообразной формы

В результате исследований свойств уплотнительных экструзионных прокладок разнообразных профилей, проведенных КиевЗНИИЭП, выявлено, что окончательные их размеры после обработки в ванне с горячим глицерином увеличиваются почти на 60 % по сравнению с начальными (при выходе из головки пресса). Причем увеличение размеров в зависимости от количества резиновой массы в различных сечениях было неодинаковым. Следовательно, прокладки крестообразной формы с многочисленными продольными гофрами и продольными каналами изготовить технически сложно, и задача эта трудноосуществима.

Кроме того, профилированную прокладку можно установить в стык лишь в том случае, если диаметр паза менее расстояния между крыльями, что требует строгого соблюдения всех допусков при монтаже.

Поэтому сегодня является актуальной задачей разработка конструкции открытого стыка, которая позволит устранить ряд недостатков, присущих стыку, герметизи-

руемому крестообразной профилированной прокладкой.

Целью работы является разработка конструкции открытого стыка применительно к производственным, сельскохозяйственным, складским панельным зданиям и проверка его технологической надежности.

Цель достигалась решением следующих **задач**:

- анализ существующих вариантов устройства открытых стыков;
- разработка технологии производства работ по устройству стыка наружных стеновых панелей, герметизируемому при помощи упругой ленты;
- разработка методики определения давления упругой прокладки на стенки канала.

Объект исследования — здания панельного типа производственного, сельскохозяйственного и складского назначения.

Предмет исследований — открытые стыки панельных зданий.

Методика исследований — анализ литературных и нормативных источников;

физическое моделирование стыка наружных стеновых панелей, герметизируемого при помощи упругой ленты; аналитическое исследование давления упругими прокладками из стеклотекстолита на стенки канала стыка.

Разработанная конструкция открытого стыка приведена на рисунке 2. Данная конструкция позволяет устранить ряд недостатков, присущих стыку, герметизируемому крестообразной профилированной прокладкой. После окончания монтажа наружных стеновых панелей с навесной люльки в вертикальный шов заводится с помощью лопатки эластичная лента. Устанавливают ее сверху вниз по всей длине стыка. Образующаяся при этом прокладка прижимается к поверхности стыкуемых панелей благодаря упругим свойствам материала, из которого сделана лента, и принимает форму паза.

Ширина ленты превышает длину окружности паза на 42...43 мм, что соответствует величине допустимого отклонения ширины вертикальных стыков (2...3 мм),

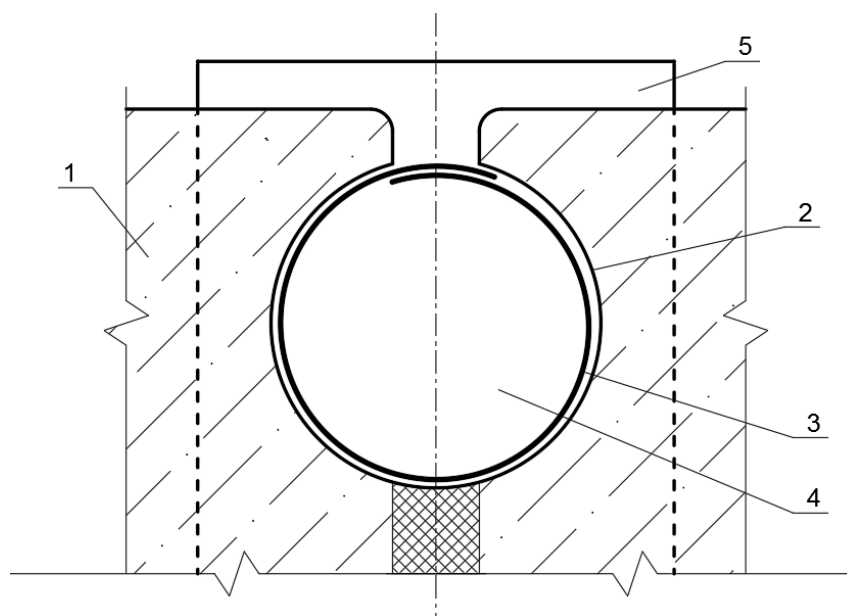
двум отклонениям линейных размеров стеновых панелей (20 мм) [3] и нахлесту ленты, равному, например, 20 мм. В результате на поверхности прокладки, имеющей выход наружу стыка, образуется нахлест даже при ширине паза более допустимой.

Расположенный в цокольной части здания слив способствует выравниванию давления снаружи и внутри стыка, что предотвращает всасывание воды в месте нахлеста ленты при действии косога дождя с ветром.

В случае просачивания небольшого количества воды в декомпрессионную камеру будет происходить ее сток по внутренней поверхности прокладки через слив.

Работоспособность предложенного нами способа герметизации стыков проверена на моделях.

При этом установлено, что вода в декомпрессионную камеру не проникает, следовательно, исключается замерзание ее в цокольной части и разрушение конструкции стыка.



1 — наружные стеновые панели; 2 — продольные пазы; 3 — эластичная лента;
4 — декомпрессионный канал; 5 — слив

Рисунок 2 Герметизация вертикального стыка наружных стеновых панелей при помощи упругой ленты

Заводка ленты в проектное положение не представляет сложности. Трудоемкость при этом ниже, чем при установке прокладочных герметиков.

Лента для прокладки легко изготавливается методом экструзии, так как толщина ее постоянна. Наличие запаса по ширине дает возможность загерметизировать даже при увеличении ширины зазора между стыкуемыми панелями.

Для определения давления, оказываемого упругой прокладкой на стенки канала, образующего паз, нами получена зависимость между радиусом наружной поверхности прокладки и деформативностью. Принимаем максимальную деформацию вертикальных стыков $\xi = 2$ мм.

В этом случае увеличение радиуса наружной поверхности выразится зависимостью

$$U = \xi. \quad (1)$$

Такая связь величин обусловлена тем, что увеличение радиуса прокладки может возникнуть только за счет деформаций наружных стеновых панелей, т. е. при увеличении диаметра канала, в который она устанавливается.

Давление на стенки канала создастся благодаря упругим свойствам материала, зависящим от модуля упругости.

Увеличение радиуса наружной поверхности при деформациях стыков определим, воспользовавшись выкладками задачи Ламе [4]:

$$U = \frac{pr_1}{c}, \quad (2)$$

где p — давление, оказываемое прокладкой на стенки канала;

r_1 — наружный радиус цилиндрической прокладки;

c — коэффициент жесткости, определяемый формулой

$$c = E \left(r_1^2 - r_2^2 \right) / \left[r_1^2 + r_2^2 + \mu \left(r_1^2 - r_2^2 \right) \right], \quad (3)$$

где E — модуль упругости прокладки;

r_2 — внутренний радиус прокладки;

μ — коэффициент Пуассона.

Подставив в (2) выражение (3), получим

$$U = pr_1 \left[r_1^2 + r_2^2 + \mu \left(r_1^2 - r_2^2 \right) \right] / \left[E \left(r_1^2 - r_2^2 \right) \right]. \quad (4)$$

Модуль упругости прокладки шириной 10 мм определим, воспользовавшись формулой изгибной жесткости. В системе СИ

$$EI = 0,01\delta^3 E_m / \left[12 \left(1 - \mu^2 \right) \right], \quad (5)$$

где I — момент инерции сечения;

δ — толщина прокладки;

E_m — модуль упругости ленты, из которого изготовлена прокладка.

Для канала круглого сечения

$$I = \pi r_1^3 \delta. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), найдем модуль упругости прокладки:

$$E = 0,01\delta^2 E_m / \left[12 \left(1 - \mu^2 \right) \pi r_1^3 \right]. \quad (7)$$

Тогда выражение (4) с учетом (7) приобретает вид

$$U = \frac{12\pi r_1^4 p \left(1 - \mu^2 \right) \left[r_1^2 + r_2^2 + \mu \left(r_1^2 - r_2^2 \right) \right]}{0,01\delta^2 E_m \left(r_1^2 - r_2^2 \right)}. \quad (8)$$

Давление, оказываемое прокладкой на стенки канала, определим, подставив полученное выражение приращения радиуса прокладки в (1) и преобразовав его относительно p :

$$p = \frac{2 \cdot 10^{-5} \left(r_1^2 - r_2^2 \right) \delta^2 E_m}{12\pi r_1^4 \left(1 - \mu^2 \right) \left[r_1^2 + r_2^2 + \mu \left(r_1^2 - r_2^2 \right) \right]}. \quad (9)$$

По предложенной методике рассчитано давление, создаваемое прокладками из стеклотекстолита на разных наполнителях при толщинах ленты 1×10^{-3} м, 2×10^{-3} м, 3×10^{-3} м и радиусах паза 3×10^{-2} м, 5×10^{-2} м.

Рядом исследователей установлено, что материалы, изготовленные на наполнителях

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

из кремнийорганических фенолоформальдегидных смол, сохраняют свои свойства без изменений на протяжении 18...20 лет.

В таблице 1 приведены расчетные давления на стенки канала стыкуемых панелей, создаваемые упругой лентой, изготовленной из стеклотекстолита с различными наполнителями.

Как видно из таблицы, максимальное давление на стенки канала создается прокладками, изготовленными из стеклотек-

столита на наполнителях из эпоксидной, фенолоформальдегидной и полиэфирной смол, причем упругие свойства этих материалов лучше реализуются при радиусе паза 3×10^{-2} м.

Суммарный распор по длине стыка достаточен для удержания прокладки от сползания под собственным весом. Следовательно, при установке в стык упругой ленты проявляются квазиадгезионные свойства между прокладкой и каналом паза.

Таблица 1

Результаты расчета давления, оказываемого упругой прокладкой на стенки канала

Материал упругой ленты	Радиус паза, м	Толщина ленты, м	Давление прокладки на единицу площади, Н/м ² (Па)
Стеклотекстолит на наполнителе из фенолоформальдегидной смолы ($E_m = 245,25 \cdot 10^8$ Н/м ² , $\mu = 0,17$)	3×10^{-2}	1×10^{-3}	557,40
	3×10^{-2}	2×10^{-3}	4504,60
	3×10^{-2}	3×10^{-3}	15354,70
	5×10^{-2}	1×10^{-3}	43,20
	5×10^{-2}	2×10^{-3}	347,50
	5×10^{-2}	3×10^{-3}	1180,00
Стеклотекстолит на наполнителе из эпоксидной смолы ($E_m = 313,92 \cdot 10^8$ Н/м ² , $\mu = 0,22$)	3×10^{-2}	1×10^{-3}	725,94
	3×10^{-2}	2×10^{-3}	5944,86
	3×10^{-2}	3×10^{-3}	20306,70
	5×10^{-2}	1×10^{-3}	68,67
	5×10^{-2}	2×10^{-3}	490,50
	5×10^{-2}	3×10^{-3}	1167,70
Стеклотекстолит на наполнителе из полиэфирной смолы ($E_m = 245,25 \cdot 10^8$ Н/м ² , $\mu = 0,2$)	3×10^{-2}	1×10^{-3}	490,50
	3×10^{-2}	2×10^{-3}	4022,10
	3×10^{-2}	3×10^{-3}	15794,10
	5×10^{-2}	1×10^{-3}	39,24
	5×10^{-2}	2×10^{-3}	353,16
	5×10^{-2}	3×10^{-3}	1196,82
Стеклотекстолит на наполнителе из кремнийорганической смолы ($E_m = 176,58 \cdot 10^8$ Н/м ² , $\mu = 0,1$)	3×10^{-2}	1×10^{-3}	392,40
	3×10^{-2}	2×10^{-3}	3139,20
	3×10^{-2}	3×10^{-3}	10791,00
	5×10^{-2}	1×10^{-3}	29,43
	5×10^{-2}	2×10^{-3}	245,25
	5×10^{-2}	3×10^{-3}	784,80

Установлено, что при помощи упругой прокладки из ленты представляется возможным надежно загерметизировать стык.

С уменьшением диаметра паза и увеличением толщины ленты возрастает давление, создаваемое прокладкой на стенки канала.

Для прокладок предпочтительно использовать ленты с большими значениями модуля упругости.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку конструкции открытого стыка применительно к жилым панельным зданиям.

Библиографический список

1. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 [Текст]. — Введ. 2013-07-01. — М. : ООО «Аналитик», 2012. — 100 с.
2. А. с. 51407 СССР, Е 04 В 1/38. Открытый вертикальный стык наружных панелей [Текст] / И. С. Петров (СССР). — №1915213-33 ; заявл. 04.05.73 ; опубл. 15.05.76, Бюл. № 18. — 2 с.
3. СП 70.13330.2012. Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 [Текст]. — Введ. 2012-12-25. — М. : Минрегион России, 2012. — 293 с.
4. Валишвили, Н. В. Сопротивление материалов и конструкций [Текст] : учебник для вузов / Н. В. Валишвили, С. С. Гаврюшин. — М. : Юрайт, 2019. — 429 с.

© Будзило Е. Е.

© Збицкая В. В.

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

Статья поступила в редакцию 20.04.2022.

PhD in Engineering Budzilo E. E., Zbitskaia V. V. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, kilrilch@mail.ru)

ON THE ISSUE OF IMPROVING THE WATER PROTECTION INDICATORS OF OPEN JOINTS OF INDUSTRIAL, AGRICULTURAL, WAREHOUSE PANEL BUILDINGS

In this article, the analysis of the existing versions of open joint devices is carried out, a water protection option using an elastic stopwater as a sealing material is developed. Studies have proved that this version of the external joint device allows you to reliably seal the vertical joint between the panels of the building, and with a decrease of groove diameter and an increase of tape thickness, the pressure created by the stopwater on the channel walls increases.

Key words: *open joint design, water protection, sealing, elastic stopwater, joint mouth, panel building.*

УДК 72:711.459.6(985)

к.т.н. Николаева Е. К.,
Лахтин К. И.,
Глушкина И. К.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АДМИНИСТРАТИВНО-ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ В СОСТАВЕ ВОЕННЫХ БАЗ В АРКТИКЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В статье рассмотрена проблематика актуального направления проектирования военных архитектурных объектов в Арктической зоне Российской Федерации. Изучены факторы, методы и принципы проектирования данных объектов.

В результате изучения архитектурно-планировочных и функциональных особенностей проектирования АЖК в составе военных баз в Арктике Российской Федерации авторами были обобщены факторы формирования, влияющие на типологию арктических объектов.

В процессе исследования авторами были разработаны основные аспекты адаптации архитектурных систем, рекомендуемые для применения в условиях Арктики. Определены современные тенденции и модели арктических объектов.

Разработаны принципы проектирования административно-жилых комплексов в составе военных баз в Арктике.

В результате исследования разработана теоретическая модель комплекса с учетом взаимодействия методов, факторов и принципов Арктического строительства. Проведена апробация разработанных принципов на примере проектирования здания административно-жилого комплекса в составе военной базы в Арктике Российской Федерации.

Ключевые слова: *принципы проектирования, Арктика, административно-жилой комплекс, военная база, строительство в экстремальном климате, принципы адаптации архитектурных систем.*

Выбор тематики исследования в первую очередь определяется ее актуальностью.

Рассмотрев территориальные характеристики России, можно сделать вывод о том, что Российская Федерация является самой большой в мире по территории северной, приполярной, арктической страной. Арктический вектор геополитики и стратегического социально-экономического развития Российской Федерации получил достаточно весомое обоснование среди общенациональных задач до 2030 года [1].

Ввиду вышеизложенного освоение Русского Севера становится одной из наиболее приоритетных задач в геополитическом векторе Российской Федерации.

Цель данной работы заключается в разработке принципов и методов проектирования военных объектов для экстремальных условий Арктики.

Объект исследования — административно-жилые комплексы в составе военных арктических баз.

Предмет исследования — принципы проектирования административно-жилых комплексов, входящих в состав военных городков замкнутого типа, представляющих собой основной вид возводимых объектов в Арктике.

Задачи исследования:

- определить факторы, влияющие на формирование административно-жилых комплексов в составе военных баз в Арктике;
- определить виды и способы адаптации архитектурных систем к экстремальным условиям среды;
- разработать актуальные принципы проектирования АЖК в составе военных баз в Арктике, основанные на поиске новых, в том числе инновационных решений жилища

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

и систем жизнеобеспечения, в полной мере используя технические инновации и развитие передовых технологий.

Факторы формирования северных военных объектов делятся на внутренние и внешние.

К наиболее значительным внешним факторам можно отнести следующие: градостроительные, природно-климатические, социально-экономические, геополитические, экологические.

К внутренним: инфраструктурные, ресурсные, объемно-планировочные и функциональные.

Градостроительные факторы оказывают значительное влияние на выбор типологи-

ческой характеристики объекта. Типология северных объектов следующая (рис. 1):

- 1) автономный блок;
- 2) линейная структура;
- 3) блочная структура;
- 4) ветвистая структура;
- 5) компактная структура;
- 6) узловая структура;
- 7) дисперсная структура;
- 8) комбинированная структура.

Рассмотренные факторы оказывают значительное влияние на формирование типовых схем организации поселений, которые, в свою очередь, разрабатываются путем синтеза двух или более требований (рис. 2).

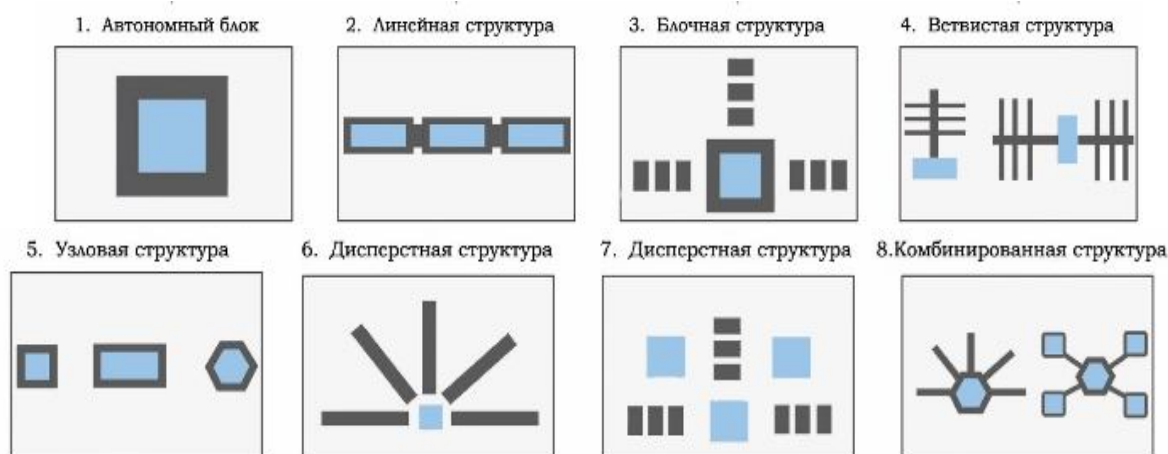


Рисунок 1 Типология композиционных решений северных объектов



Рисунок 2 Формирование типовых схем организации северных поселений

Условия жизнедеятельности (функционального назначения объектов и людей) в Арктике во многих отношениях экстремальны. Они далеки от привычных, тех, которые на «материке», а значит, проблема адаптации к ним всегда будет актуальна [2]. Адаптация — ответ архитектурной системы на динамику окружающей среды. Архитектурная система, в свою очередь, представляет совокупность функционально связанных архитектурных объектов, образующих единую целостность, существующую во взаимодействии с окружающей средой.

В архитектурной практике накоплен богатый опыт способов адаптации архитектурных объектов к экстремальным условиям среды. Однако большинство из них относятся к технологическим, конструктивным и инженерно-техническим решениям. Непосредственно архитектурных, т. е. связанных с пространственной адаптацией, меньшинство. Следовательно, целесообразно выявить виды адаптации архитектурных систем к экстремальным проявлениям внешней среды, дать им определение и обозначить перспективы их применения в архитектурной практике.

Перспективы применения различных видов адаптации архитектурных объектов в экстремальных условиях среды направлены на разработку конкретных ее механизмов для каждого из указанных выше видов.

Применение данного обобщенного описания видов адаптации открывает перед архитектором ряд перспективных направлений в научной и проектной деятельности.

Критерии адаптивности архитектурной системы основываются на трех основных векторах: время, сложность и масштаб.

Синтез вышеупомянутых компонентов позволяет сформировать основные аспекты адаптации архитектурных систем:

1) пространственная вариативность: наличие изначально множества вариантов использования жилого пространства в границах одного и того же планировочного и технического решения;

2) объединение/разделение жилых ячеек: деление и объединение жилых ячеек в различные помещения;

3) пространственное расширение и развитие: изменение размеров и площади жилища, расширение пространства;

4) функционально-техническое переоборудование: изменение планировки, замена и прокладка новых инженерных сетей, перенос вертикальных коммуникаций, перегородок.

Результат анализа и экстраполяции этих особенностей на весь комплекс адаптивных средств говорит о том, что курс на синтез разных проектных технологий, ориентированный на усиление общего адаптивного потенциала есть фундаментальный признак феномена проектной культуры.

Позиционирование административно-жилых комплексов в составе военных арктических баз как принципиально нового военного объекта возможно с условием его формирования согласно следующим принципам: функциональной диверсификации, вариативности, модульности, автономности, дискретности, архитектурно-строительной гибкости, функциональной емкости, дифференциации и резервирования ресурсов.

Анализ исследуемого материала позволил предложить следующие принципы проектирования административно-жилых комплексов в составе военных арктических баз:

1) принцип функциональной диверсификации — увеличение числа видов использования здания или сооружения;

2) принцип вариативности — увеличение числа вариантов планировочных решений для каждого из видов функционального использования здания или сооружения;

3) принцип модульности — группировка и взаимозаменяемость функционально-планировочных компонентов зданий;

4) принцип автономности — обеспечение независимого подвода коммуникаций к каждому функционально-планировочному компоненту здания;

5) принцип дискретности — построение адаптивной архитектуры от частного к общему, от функционально-планировочных элементов к адаптивным планировочным модулям, далее — к универсальной параметрической модели. Для достижения наиболее эффективных проектных решений необходимо последовательно добиться наивысших уровней адаптивности в каждом компоненте формирования архитектуры комплекса;

6) принцип архитектурно-строительной гибкости — увеличение доли легко изменяемых компонентов в общем числе подсистем зданий;

7) принцип функциональной емкости — максимум функциональных возможностей при минимальной площади;

8) принцип дифференциации — представляет собой конструктивную и эксплуатационную независимость систем здания и их элементов;

9) принцип резервирования ресурсов — резервирование пространственных и технологических ресурсов с учетом критерия устойчивости развития системы.

Современные тенденции и модели арктических объектов базируются, в первую очередь, на принципах адаптивности, предлагая новые варианты архитектурной организации. К наиболее значимым тенденциям в векторе арктического строительства необходимо отнести:

1) экологичный подход — отказ (частичный) от дизельного топлива, переход на работу от энергии ветра и солнца;

2) мобильность — использование гидравлических стоек позволяет легко поднимать модули комплекса над снежными заносами. Полозья в основании способствуют передвижению отдельных фрагментов по материку;

3) логистика предусматривает использование контейнеров со строительными материалами путем интеграции их в конструкции для экономии затрат и времени [3];

4) динамика: форма и высота здания определяются исходя из анализа динамики

снежных потоков. Конструкцию необходимо рассчитать таким образом, чтобы окна и внешние двери не заносило снегом;

5) аэродинамика: для решения проблемы теплопотери предлагается строить здания, акцентируя внимание на аэродинамических свойствах. Благодаря снижению турбулизации ветра тепло будет оставаться в здании. Постройки с аэродинамической формой менее подвержены ветровым и снеговым воздействиям [4];

6) материалы: проводятся изыскания по созданию инновационных металлических и полимерных строительных материалов, устойчивых к воздействиям низких температур и коррозионным повреждениям. Кроме того, перерабатываются некоторые энергетические и топливные системы, что позволяет повысить энергоэффективность объекта;

7) проекты типа «здание-поселение» — создание поселения с искусственным климатом, полностью замкнутым циклом жизнеобеспечения, аналогично космическому кораблю. При разработке применяются авиакосмические технологии.

При проектировании военного арктического объекта особое внимание должно быть уделено свойствам пространственной связанности.

Практическое значение структуры связей заключается в определении вариаций взаимной доступности пространств и, соответственно, способности достижения оболочек обитания, предназначенных для различных видов деятельности, лиц, ресурсов, информации и т. д. [5].

Трудно переоценить значение этого свойства, поскольку человек целевым образом использует пространственную форму для регулирования своей деятельности и, следовательно, использует разные приемы проникновения из одного пространства в другие. Кроме того, контроль над пространственной формой определяет важные психологические реакции людей. Исследования психологов и социологов подтверждают, что чувства возбуждения,

беспокойства, удовлетворения, гордости могут быть обусловлены характером регулирования пространственной доступности.

Пространства (или их формальные эквиваленты — локумы) структурно связаны между собой в рамках анализируемых архитектурных объектов. Они подчинены общей логике структуралистской рациональности, объясняющей взаимоотношения элементов системы.

На основе исследований структуралиста Л. Ельмслева [6] для разработки концепции выбраны три типа зависимостей элементов-локумов, встречающихся в структурах пространственной организации архитектурных объектов: координация, детерминация и констелляция. Это позиции, которыми описывается все разнообразие форм локального взаимодействия пар пространств в любой пространственной структуре (рис. 3):

1. Координация, или взаимная зависимость. Два пространства-локума, находясь в составе структуры, в силу своей позиции могут оказывать влияние на свойства друг друга. В качестве примера представим себе планировочную ситуацию, в составе которой существуют помещения, изменение свойств которых (например, запирающие определенные двери и изменение этим формы связанности с другими помещениями) оказывает влияние на пространственные свойства других помещений.

2. Детерминация, или односторонняя зависимость. Одно пространство меняет структурные свойства другого, оставаясь неизменным. Например, в планировке до-

ма атриумного типа (примером может служить традиционный греческий дом с центральным двором-атриумом) пространство главного атриума «контролирует» (или детерминирует) окружающие пространства. Исключение одного из подконтрольных пространств из общей структуры не нарушит пространственной циркуляции через атриум.

3. Констелляция, или взаимная независимость. Пространства существуют независимо друг от друга, а изменение их свойств не отражается друг на друге. Например, в условиях решетчатой планировки города пространства перекрестков связаны друг с другом многовариантными маршрутами, а исключение одного из них не сказывается существенным изменением свойств связанности других.

Анализ исследуемого материала позволил сформулировать три основополагающих принципа, а также методы их реализации, на которых будет базироваться разработка проектного решения административно-жилого комплекса в составе военной базы в Арктике Российской Федерации.

Принцип 1: решение проблемы освоения арктического пространства.

Задачи:

- 1) обеспечение национальной безопасности России в Арктике [7];
- 2) формирование опорных зон развития, которые будут способствовать созданию условий для ускоренного социально-экономического развития региона;
- 3) создание рабочих мест при строительстве и дальнейшей эксплуатации объекта [1].

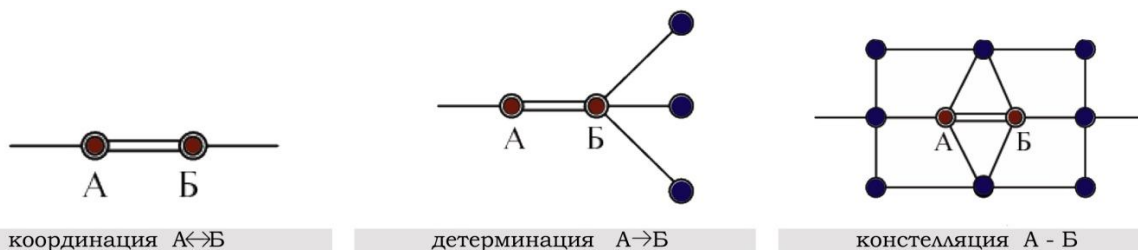


Рисунок 3 Типы зависимостей элементов-локумов, встречающихся в структурах пространственной организации северных архитектурных объектов

Методы реализации:

1) при разработке проектного предложения по формированию административно-жилого комплекса применить инновационные решения жилища и систем жизнеобеспечения, в полной мере использовать технические инновации и развитие передовых технологий;

2) предусмотреть возможность комфортного проживания и выполнения служебных обязанностей группы из 150 человек в течение полутора лет.

Принцип 2: создание комфортного пространства.

Задачи:

1) создание пространства с комфортным микроклиматом для круглогодичного использования;

2) проектирование горизонтальных связей, комфортных для круглогодичного использования;

3) создание многофункциональных пространств [10].

Методы реализации:

1) при формировании общественных пространств и жилых объектов необходимо интегрировать большое количество натуральных текстур, цветов и природных материалов во внутреннюю отделку [9];

2) предусмотреть имитацию открытого пространства при проектировании общественных и досуговых пространств [9];

3) предусмотреть размещение элементов социальной инфраструктуры с учетом возрастающего спроса на монументальные объекты событийного и духовного назначения.

Принцип 3: проектирование объекта с учетом концепции «объект — человек — среда».

Задачи:

1) учет изоляции региона и отсутствие традиционной инфраструктуры в качестве ограничивающих факторов, затрудняющих доставку строительных материалов и строительство в целом [3];

2) архитектору необходимо гармонично сочетать проектируемый объект с окру-

жающим ландшафтом и учетом особенностей экстремальной среды.

Методы реализации:

1) использование водного ресурса как части участка для строительства;

2) при разработке архитектурно-строительных решений необходимо применить инновационные металлические и полимерные строительные материалы, устойчивые к воздействиям низких температур и коррозионным повреждениям [11];

3) используемые методы строительства и дальнейшей эксплуатации объекта должны быть экологичными, т. к. на части разрабатываемой территории размещается заповедник.

В результате исследований, проводимых в рамках данной научной работы, была сформирована теоретическая модель проектирования административно-жилого комплекса в составе военной базы в Арктике Российской Федерации. Проектное предложение будет базироваться на равнозначном взаимодействии трех компонентов «архитектура — человек — среда» (рис. 4).

Результатом данной научной работы, является апробация разработанных принципов проектирования и теоретической модели на примере проектирования здания административно-жилого комплекса в составе военной базы в Арктике Российской Федерации. Авторами разработано объемно-планировочное и конструктивное решение здания.

Административно-жилой комплекс базы состоит из пяти блоков основного пятиэтажного здания (рис. 5).

Высота этажа составляет 3000 мм. Общая площадь комплекса — 10500 м². Здание комплекса окрашено в цвета российского флага. На кровле применены узоры ромбовидного мотива. Административно-жилой комплекс рассчитан на автономное проживание и выполнение служебных задач гарнизоном численностью 140 человек в течение 18 месяцев, что обеспечивается хранилищами продовольствия и горючего.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

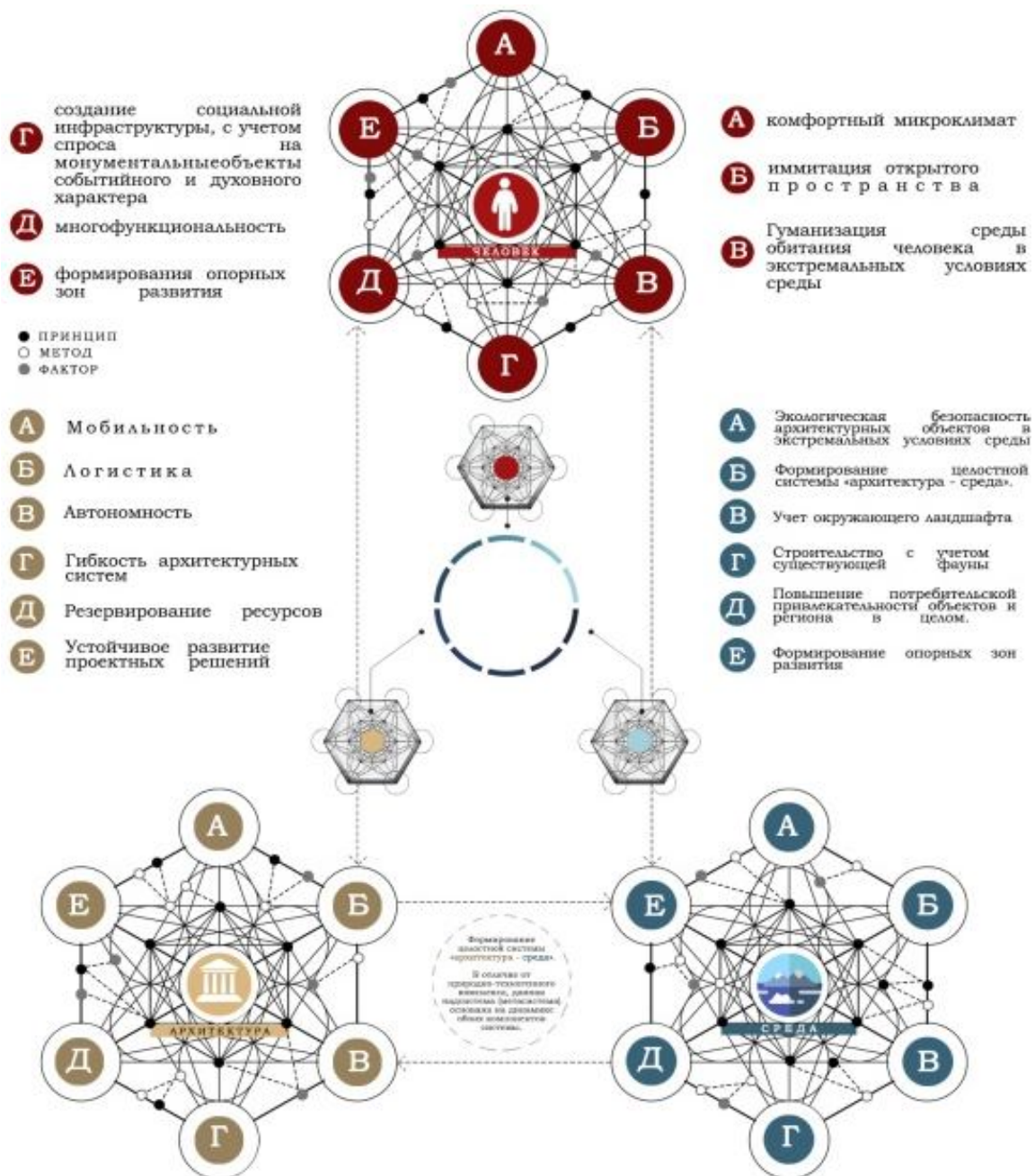


Рисунок 4 Теоретическая модель проектирования административно-жилого комплекса в составе военной базы в Арктике Российской Федерации

Основное здание административно-жилого комплекса имеет в плане форму, образованную композицией ступенчатых ромбов (рис. 6).

Здание стоит на сваях, заглублённых в вечную мерзлоту, и продувается снизу, поэтому не заматывается снегом даже во время сильных бурь. Отапливаемый нижний

этаж — технический, предназначен для коммуникаций. В центре здания (блок Д), на пересечении лучей кровли, находится атриум, над центральной опорой которого (одновременно являющейся флагштоком) размещена застеклённая смотровая площадка, с которой контролируется вся территория базы.



Рисунок 5 Перспективный вид административно-жилого комплекса

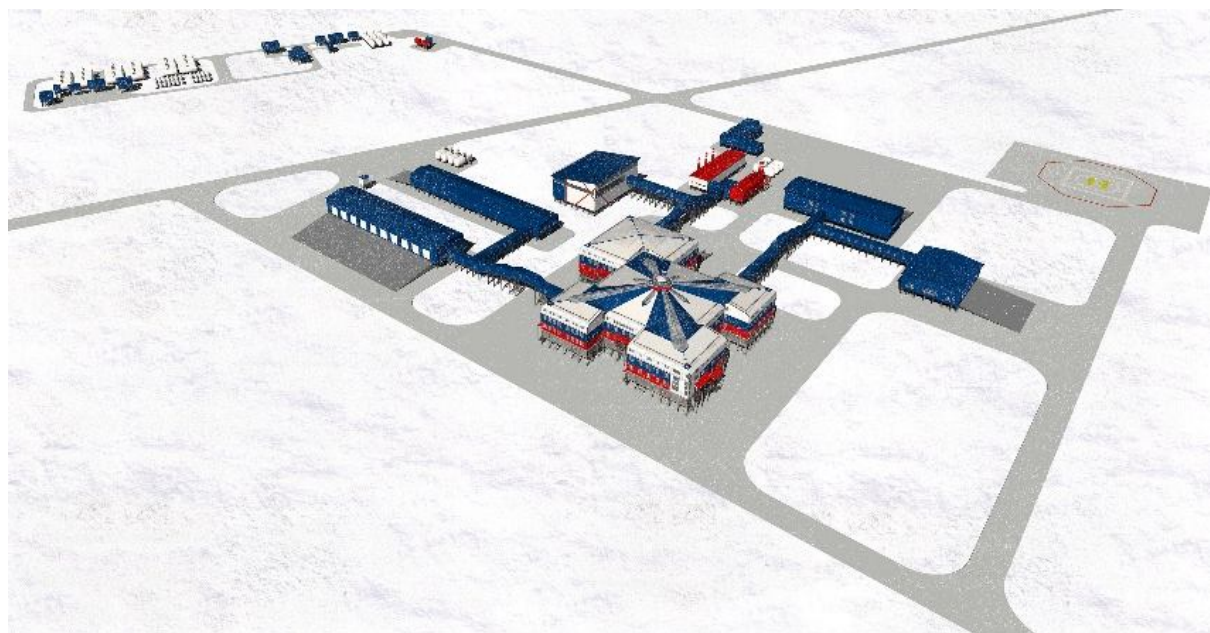


Рисунок 6 Перспективный вид с юго-западной стороны на административно-жилой комплекс в составе военной базы в Арктической зоне Российской Федерации

Поиск концепции дизайна архитектурно-художественного облика проектируемого административно-жилого комплекса базировался на всестороннем анализе как специфических военных символов и знаков фортификационного, геральдического и орнаментального характера, так и на анализе культуры Северного региона в целом и совмещенных в проектируемом объекте.

Выводы:

1. В результате изучения архитектурно-планировочных и функциональных особенностей проектирования административно-жилых комплексов в составе военных баз в Арктике Российской Федерации были обобщены факторы формирования, влияющие на типологию арктических объектов. Исходя из принципов воздействия на процесс создания градостроительных

систем, были выделены внешние и внутренние факторы воздействия.

2. Рассмотрены виды и способы адаптации архитектурных систем к экстремальным условиям среды, изложены перспективы применения рассмотренных адаптационных механизмов. Дана характеристика основным критериям адаптивности системы. Изучены параметры, влияющие на проектные предложения по адаптации среды.

Были разработаны основные аспекты адаптации архитектурных систем, рекомендуемые для применения в условиях Арктики.

3. Разработаны принципы проектирования административно-жилых комплексов в составе военных баз в Арктике: принцип функциональной диверсификации, принцип вариативности, принцип модульности, принцип автономности, принцип дискретности, принцип гибкости архитектурных систем, принцип функциональной емкости, принцип дифференциации, принцип резервирования ресурсов.

4. Определены современные тенденции и модели арктических объектов: экологический подход, мобильность, логистика, динамика, аэродинамика, инновационные материалы и проектирование объектов типа «здания-поселения».

5. Рассмотрены типы зависимостей элементов-локумов, встречающихся в структурах пространственной организации архитектурных объектов.

6. Определены основные задачи и методы их решения в рамках проектирования АЖК в составе военной базы.

7. Разработана теоретическая модель комплекса с учетом взаимодействия методов, факторов и принципов арктического строительства.

8. Проведена апробация разработанных принципов на примере проектирования здания административно-жилого комплекса в составе военной базы в Арктике Российской Федерации. Разработано объемно-планировочное и конструктивное решение здания.

Библиографический список

1. О стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года [Текст] : указ Президента РФ от 26 октября 2020 № 645 // *Собр. законодательства РФ*. — 2020. — 64 с.
2. Галеев, С. А. Виды адаптации архитектурных систем к экстремальным условиям среды [Текст] / С. А. Галеев // *Системные технологии*. — 2020. — № 37. — С. 77–83.
3. Мкртчян, С. В. Адаптивность как системное свойство среды проживания [Текст] / С. В. Мкртчян // *Вестник ОГУ*. — 2014. — № 5 (166). — С. 79–84.
4. Сикачев, А. В. Адаптивность жилища как условие его доступности [Текст] / А. В. Сикачев // *Жилищное строительство*. — 2003. — № 7. — С. 2–6.
5. Киселева, Н. Г. Концепция адаптивных структур в архитектуре жилища / Н. Г. Киселева // *Архитектон: известия вузов*. — 2010. — № 2 (30). — 4 с. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://archvuz.ru/numbers/2010_2/014.
6. Ельмслев, Л. Прологомены к теории языка [Текст] / Л. Ельмслев // *Новое в лингвистике*. — М. : Прогресс, 1960. — Вып. 1. — С. 264–389.
7. Лукин, Ю. Ф. Великий передел Арктики [Текст] / Ю. Ф. Лукин. — Архангельск : Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. — 399 с.
8. Зыкова, В. К. Строительство зданий и сооружений в районах многолетней мерзлоты [Текст] / В. К. Зыкова, Р. О. Лекчапов. — Тюмень : Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени А. И. Прошлякова, 2017. — С. 64–67.
9. Калинина, Н. С. Архитектурные, технические и дизайнерские особенности проектирования жилых и общественных зданий в условиях Крайнего Севера [Текст] / Н. С. Калинина, Н. В. Морозов // *Системные технологии*. — 2019. — № 32. — С. 40–46.

10. Сапрыкина, Н. А. Моделирование жилой среды для экстремальных условий как ресурс безопасности обитания [Текст] / Н. А. Сапрыкина // *Architecture and Modern Information Technologies*. — 2019. — № 4 (49). — С. 139–168. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://marhi.ru/AMIT/2019/4kvart19/PDF/10_saprykina.pdf.

11. Линейцев, А. А. Проблемы строительства сооружений в Арктике [Текст] / А. А. Линейцев // *Молодой ученный*. — 2021. — № 5 (347). — С. 74–78.

© Николаева Е. К.

© Лахтин К. И.

© Глушкина И. К.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СИА ЛГУ им. В. Даля Псюком В. В.,
к.т.н., доц., зав. каф. АДиСК ДонГТИ Бондарчуком В. В.**

Статья поступила в редакцию 31.05.2022.

PhD in Engineering Nikolaeva E. K., Lakhtin K. I., Glushkina I. K. (LSU named after V. Dahl, Alchevsk, LPR)

PRINCIPLES OF DESIGNING ADMINISTRATIVE AND RESIDENTIAL COMPLEXES AS PART OF MILITARY BASES IN THE ARCTIC OF THE RUSSIAN FEDERATION

The article considers the problematics of the current direction of designing military architectural objects in the Arctic zone of the Russian Federation. Factors, methods and principles of designing these objects are studied.

As a result of studying the architectural, planning and functional features of designing the ARC as part of military bases in the Arctic of the Russian Federation, the authors summarized the formation factors affecting the typology of Arctic objects.

In the course of the study, the authors developed the main aspects of the adaptation of architectural systems recommended for use in the Arctic. The up-to-date trends and models of Arctic objects have been identified.

The principles of designing administrative and residential complexes as part of military bases in the Arctic have been developed.

As a result of the research, a theoretical model of the complex has been developed, considering the interaction of methods, factors and principles of Arctic construction.

Key words: *design principles, Arctic, administrative and residential complex, military base, engineering in extreme climate, principles of adaptation of architectural systems.*

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**MECHANICAL ENGINEERING
AND MACHINE SCIENCE**

УДК 536.46+662.611/612

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

ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ. СООБЩЕНИЕ 3. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ОБРАБАТЫВАЮЩИХ И ОБСЛУЖИВАЮЩИХ ОТРАСЛЯХ ЭКОНОМИКИ

В третьем сообщении кратко описано применение детонационно-газовых технологий и устройств в химической и нефтехимической промышленности, машиностроении и металлообработке, строительстве и производстве строительных материалов, сельском и лесном хозяйстве, ЖКХ, для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в военном деле и др.

***Ключевые слова:** безыгольные инъекции, детонационно-газовое напыление, детонационный синтез, импульсная обработка, метание тушащих веществ, обработка дисперсных частиц, объемная детонация, очистка, получение веществ, удаление заусенцев.*

Химическая и нефтехимическая промышленность. Переработка углеводородов. Газовая детонация перспективна для переработки, в том числе комплексной, углеводородов, особенно природного газа. Так, по а. с. СССР № 857228 возможно получение одновременно нескольких продуктов, например, азотной кислоты, ацетилена и электроэнергии. В этом случае реактор установки содержит детонационную камеру сгорания.

Получение веществ в продуктах газовой детонации. Наноструктурный поликристаллический диоксид титана получен в процессе газовой детонации и пирогидроллиза. В качестве сырья использовали тетрахлорид титана ($TiCl_4$) в газовой фазе, а в качестве источника энергии — предварительно смешанные газы O_2 и H_2 . Продукты представляют собой смесь кристаллов TiO_2 , находящегося в фазе рутила (80 %) и анатаза (20 %). Газофазный детонационный синтез имеет преимущества с точки зрения контроля размера частиц, их кристаллической структуры, чистоты и т. д. Процесс газофазной детонации смеси этанола, $TiCl_4$ и кислорода использован для синтеза наноразмерного диоксида титана в

кристаллической модификации рутила со сферическими частицами малых размеров и малой дисперсии по размерам. Таким образом, представленный способ позволяет избежать загрязнения конечного продукта и других недостатков, которые возникают при синтезе наноразмерного диоксида титана (рутила) традиционными методами [1].

Детонационное сжигание углеводородов в проточном режиме является перспективным способом получения ультрадисперсного углерода, а соответствующие импульсные газодетонационные аппараты могут стать промышленным генератором этого продукта. Получаемый углеродный конденсат представляет собой кластеры с разветвленной структурой и практически весь состоит из наноглобулярного углерода и может являться прекурсором в получении фуллеренов, углеродных нанотрубок, графенов, карбинов и пр. Имеется много сообщений о дешевом способе получения графена при детонации смесей газообразных углеводородов с кислородом [2]. Таким образом, разработан новый высокопроизводительный и относительно безопасный метод получения наноразмер-

ного углерода путем детонационного сжигания ацетиленокислородных смесей в импульсном газодетонационном аппарате. В детонирующей смеси $C_2H_2 + kO_2$ содержание кислорода варьировалось от $k=0,4$ до $0,8$. По утверждению авторов, производительность способа при объеме реактора (цилиндрическая камера) $16,6$ л достигает 300 г углерода в час. Удельная поверхность S получаемого порошка изменяется от 187 до 23 м²/г при изменении k от $0,4$ до $0,8$. Углеродные частицы имеют округлую форму и размер $35...55$ нм при $k=0,4$ и $0,5$, растут с увеличением k и достигают $d=250...350$ нм при $k=0,8$. При $k=0,68$ они приобретают форму чешуек размером более 100 нм и толщиной порядка 10 нм. Таким образом, свойства наноглерода, получаемого различными способами и в различных технологических режимах, значительно различаются.

Производство катализаторов — важнейшая отрасль промышленности, влияющая на развитие других отраслей, в частности химической, нефтеперерабатывающей и т. д. В последнее время катализ все чаще используют для защиты окружающей среды. Отдельную отрасль составляет производство катализаторов на основе редких и благородных металлов, таких как платина, палладий, родий, рений и т. д. При этом для более эффективного использования самого металла его наносят на носители — материалы, обладающие высокими значениями удельной поверхности и механической прочности. Осуществлен синтез Au- и Pd-содержащих катализаторов методом термического разложения различных прекурсоров во фронте детонационной волны. При этом реализуется одновременный синтез частиц как активного компонента, так и носителя, состоящего из детонационных углеродных форм. Возможность варьирования весового содержания активного компонента и размеров его частиц позволяет использовать детонационный метод для синтеза углероднанесенных катализаторов различных процессов.

Обработка дисперсных частиц газовой детонацией. Уровень давлений, температур и скоростей, развиваемых за детонационными волнами в газах, определяет большие потенциальные возможности технологического использования течений за сильными разрывами и широкую область их применения. Поэтому детонационные волны применяют в качестве инструмента для обработки газозвесей. Здесь под обработкой понимается воздействие, приводящее к целенаправленному изменению частиц, в частности нагревание частиц, сопровождающееся фазовыми и химическими превращениями. При этом получают продукты с заданными свойствами (образование оксидов металлов из их солей, перестройка кристаллической структуры металла или выпаривание жидкости из растворов с целью получения твердых веществ или твердых растворов). Ранее уже рассматривались применения газовой детонации для получения аморфных и быстрозакаленных порошков, сфероидизации и восстановления порошков оксидов, получения окиси азота и ацетиленовой сажи [3]. Методом газовой детонации принципиально возможно получение нитридов, но они неизбежно будут загрязнены оксидами металлов (Ti, Na), титанатами, сажей, причем доля получаемых нежелательных продуктов будет весьма значительной в массе покрытия [4].

Детонационный синтез по а. с. СССР № 1649738 применяют для получения высокодисперсного порошка цирконат-титаната свинца (ЦТС или PZT), широко используемого для производства радиокомпонентов на основе электронной керамики. При детонационной обработке многокомпонентного раствора солей циркония, титана и свинца волна в сильно детонирующей горючей смеси распространяется по системе со взвешенными каплями раствора, поток продуктов горения ($v=1$ км/с) распыляет их до микрокапель, при последующем испарении которых ($T=3500$ К) образуются высокодисперсные частицы

солей, разлагающихся при указанных температурах до оксидов.

С помощью детонации газовых смесей можно синтезировать частично стабилизированный диоксид циркония (ЧСДЦ), являющийся уникальным теплозащитным материалом конструкционной керамики. При детонационном методе синтеза, добавляя стабилизатор в виде однопипного с оксидом циркония соединения в раствор, обрабатывая (как и при синтезе PZT) его взвешенные капли высокоскоростным и высокотемпературным потоком продуктов детонации, можно получить тонкодисперсный порошок твердого раствора заданного химического состава [5].

Сушка материалов. Воздействие детонационных волн на влажное сырье для получения бентонитов позволяет производить его сушку от влажности 15 % до 1÷2 % за время воздействия 10^{-3} с, при этом высушенный материал представляет собой порошок с размером частиц 10^{-6} ÷ 10^{-5} м [6].

Получение неорганических материалов в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). При получении неорганических материалов, преимущественно тугоплавких (например, карбидов, оксикарбидов, карбонитридов, боридов, нитридов, карбоборидов и др. различных металлов и твердых сплавов на их основе), в режиме СВС в качестве поджигающего состава используют горючую смесь газов, компоненты которой вводят в состав газовой среды, нагнетаемой в камеру (патент РФ № 2006510).

Машиностроение и металлообработка.
Импульсная высокоскоростная обработка металлов. Импульсное деформирование металла обладает рядом уникальных особенностей и позволяет получить изделия сложной формы. Импульсная резка применяется для разделения холодного проката ударом коротких ножей с большим углом клиновидности для получения заготовок из пластичных сталей, а также относительно хрупких сталей с повышенным содержанием углерода, марганца и т. п. Её применяют

для получения заготовок для дальнейшей прокатки, облойной штамповки длинномерных изделий, а также для штамповки в торец [7]. На высокоскоростном оборудовании можно изготавливать детали высокой точности с минимальными штамповочными уклонами и входными радиусами в результате действия больших кратковременных деформирующих усилий. Весьма перспективным может оказаться использование высокоскоростных типов энергоприводов для выполнения операций свободнойковки или горячей штамповки деталей за один или даже несколько переходов, поскольку применение пневматической скоростной системы возврата бойка в исходное положение позволяет значительно сократить подготовительное время рабочего цикла. Импульсная высокоскоростная обработка перспективна для изготовления заготовок и деталей из труднодеформируемых материалов [7]. Большое развитие получила детонационно-газовая листовая штамповка [3]. Детонация газовых смесей используется также в машинах для импульсного брикетирования сыпучих материалов, например, стружки. При скоростях инструмента около 20 м/с из титановой стружки и стружки жаропрочных сплавов образуются брикеты, плотность которых достигает 0,8÷0,9 плотности сплошного металла [7]. Из стружки можно получать не только брикеты высокой прочности и плотности, пригодные для переплава, но и формировать целый ряд изделий, например, из стружки чёрных металлов — вкладыши-пробки для защиты дна глухондных изложниц при заливке в них стали, получать расходоуемые электроды из титановой губки, а также брикеты из стружки титановых сплавов [7].

Повышение эффективности уплотнения пористой массы в газовом баллоне достигается однократным воздействием на нее импульса повышенного давления детонационной волны газообразного ацетилена (патент РФ № 2079769). Импульс давления детонационной волны формируется в ус-

тановке, содержащей ударную трубу с инициирующим взрывной распад ацетилена устройством.

Термическая обработка. Известны попытки и исследования термической обработки металлов посредством газовой детонации в закрытых камерах, однако промышленного применения этот способ не получил. Более перспективной и достаточно разработанной является поверхностная термическая обработка с помощью импульсных плазменно-детонационных генераторов, разработанных в ИЭС НАНУ, воздействие которых аналогично лазерному лучу, но при более высокой площади пятна взаимодействия с твердым телом. Известно много примеров успешного упрочнения деталей и инструментов этим методом [3].

Удаление заусенцев. Термоэнергетический метод снятия заусенцев (ТЭМ) [8] позволяет обрабатывать полости, глухие и пересекающиеся отверстия одновременно с внешними поверхностями детали. Размеры детали не изменяются, нагрев не превышает 150 °С (за исключением слишком тонких элементов). Детали помещают в герметичную высокопрочную камеру, в которую под давлением нескольких десятков атмосфер вводят газовую водородно-кислородную или углеводородно-кислородную смесь с повышенным содержанием кислорода. Газовая смесь полностью заполняет все пространство в камере и обрабатываемых деталях (включая глухие отверстия, пересечения длинных тонких каналов и т. п.). В этом процессе детонация служит для ускорения сжигания топлива и интенсификации теплообмена. Интенсивная передача тепла от продуктов детонации к заусенцу и детали происходит, когда газ движется относительно детали с высокими скоростями. Если к моменту прогрева основания заусенца толщиной $0,2 \div 0,4$ мм до температуры плавления скорость вынужденной конвекции достаточна для разрушения образовавшейся капли, то происходит удаление заусенца с образова-

нием скругления. Метод развивается в двух направлениях: термохимическом и термоимпульсном. При термохимической обработке удаление заусенцев на кромках происходит за счет инициации их сгорания в обедненной топливной смеси, т. е. за счет повышения содержания окислителя. Термохимический метод более распространен и реализован в установках таких фирм, как Bosch, Extrude Hone, ATL. При термоимпульсном методе обработка происходит за счет быстрого воздействия на удаляемый элемент интенсивного теплового потока, вызывающего их оплавление, испарение или срыв с поверхности ударными волнами. Обработка включает в себя удаление заусенцев, притупление произвольным радиусом, размерное скругление, очистку от технологических загрязнений. Термоимпульсная обработка деталей из пластмасс и композиционных материалов распространена в меньшей степени.

Очистка поверхностей деталей. Основными источниками загрязнений поверхности деталей авиационной и других видов техники, подлежащих удалению, являются: микрочастицы, появляющиеся в результате износа в ходе эксплуатации; рабочие среды; пыль в производственных помещениях; предметы, с которыми соприкасаются детали при ремонтных работах и др. [9]. При обеспечении чистоты поверхностей деталей и рабочих полостей многих машин их ресурс может быть увеличен в два-три раза. Технология термоимпульсного удаления заусенцев и очистки поверхности в наибольшей степени удовлетворяет условиям промышленного производства.

Детонационно-газовое напыление покрытий. Процессы и оборудование для детонационно-газового напыления остаются наиболее широко применяемой областью практического использования газовой детонации [3, 10] и являются темой самостоятельного обзора. Однако появляются новые нетрадиционные области применения процессов напыления:

1. Упрочнение и балансировка абразивных кругов на керамической связке, работающих на повышенных скоростях вращения [11]. Осуществляется путем напыления корундового покрытия на боковые стороны круга с одновременным их упрочнением. Высокая скорость напыляемых частиц (600÷1000 м/с) и возможность высокоточного позиционирования деталей во время нанесения покрытия позволяют осуществить балансировку вращающихся абразивных инструментов с использованием в качестве балансирующего груза порций (навесок) порошкового материала, разогреваемого и разгоняемого энергией взрыва.

2. Изготовление кумулятивных зарядов для перфорации нефте- и газодобывающих скважин, обладающих повышенной пробивной способностью.

3. Изготовление инструмента для пластического сверления отверстий.

4. Изготовление сменных режущих пластин для токарной обработки.

Осаждение покрытий из газовой фазы в потоке продуктов газовой детонации. Процесс образования нитрида титана осуществляется в стволе детонационно-газовой установки [12]. В реакторе происходит смешивание ингредиентов, их нагрев и впрыск в канал ствола детонационной установки, где происходит дальнейший нагрев, необходимый для завершения реакции синтеза, и вместе с продуктами детонации частицы нитрида титана ускоряются к напыляемому образцу. Проведенный элементный анализ на электронно-сканирующем микроскопе показал, что атомные доли титана и азота практически совпадают, что соответствует формуле нитрида титана — TiN.

Строительство и производство строительных материалов. Обрушение сооружений. Разрабатываются способы использования газовой детонации для обрушения подлежащих ликвидации зданий и сооружений (патенты РФ № 2107889 и № 2252393). Для этого в ограниченном объеме пространства размещают эластич-

ную оболочку, заполняют ее взрывчатой смесью горючих газов и окислителя и подорывают тротиловой шашкой. Эти способы обеспечивают повышение эффективности разрушения крупных фрагментов разрушаемых объектов, повышение безопасности работ за счет снижения дальности разбрасывания осколков и могут быть использованы, например, для сноса ветхих зданий, сооружений, расчистки завалов, применяются для дробления льда при устранении ледяных заторов на реках, для раскорчевки пней и пр.

Разрушение грунтов. Способы и устройства, использующие явление газовой детонации, применяют для разработки грунта, его перемещения, укладки и уплотнения [3].

Уплотнение грунтов. Разработан газодетонационный способ уплотнения просадочных грунтов [13]. Применение метода уплотнения грунтов газовзрывным воздействием является весьма эффективным средством увеличения прочности оснований, а также уменьшения их деформируемости. Одним из способов увеличения несущей способности буронабивных свай является уплотнение грунта околоскважинного пространства с помощью газовзрывного воздействия. Уплотнение грунта околоскважинного пространства в результате газовзрывного воздействия повышает несущую способность буронабивных свай по сравнению с обычными более чем в два раза. Перспективные области применения буронабивных свай с уплотнением грунта газовзрывным воздействием весьма обширны: новое строительство; строительство в непосредственной близости от существующих сооружений, фундаментов и внутри помещений; строительство в насыпных грунтах; для усиления фундаментов и при ликвидации аварий; строительство на намывных территориях и пр.

Формование бетонных изделий. Импульсные ударно-волновые газодинамические установки (УВГУ), реализующие процесс детонации газообразных компонентов

топлива, используются в строительной индустрии для уплотнения бетонов. Бетоны, полученные уплотнением на УВГУ, обладают улучшенными характеристиками, прирост их прочности достигает 20÷40 % [14].

Очистка фильтров. В производстве асбестоцементных изделий работа листоформовочных машин (ЛФМ) в значительной степени зависит от состояния сетчатых цилиндров. Срок службы сетки из медных сплавов составляет 7÷10 смен. Задача автоматизации процесса очистки фильтрующих устройств на базе газо-детонационного оборудования решена в диссертационной работе Семернина А. Н. [15], что позволило повысить эффективность очистки фильтрующих устройств и увеличить срок службы фильтрующей сетки. Расходы на восстановление фильтрующей сетки составляют 11,5 % от ее стоимости.

Сельское и лесное хозяйство. Обработка почвы. Разработаны устройства для рыхления почвы посредством импульсного воздействия на ее поверхность снаружи ударными волнами и потоками продуктов детонации горючей смеси (патент РФ № 2015628). Трубы — генераторы детонационных волн выполняют в виде спаренных труб, имеющих общие для каждой пары труб турбулизатор и камеру сгорания. Интенсификаторы газодинамического действия перспективны для глубокого рыхления почвогрунтов.

Разрушение почвогрунта рыхлителем с газодинамическим интенсификатором осуществляется в две фазы процесса. В первой фазе происходит механическое деформирование зубом почвогрунта, в котором образуется прорезь. Во второй фазе в момент детонации происходит интенсивное разрушение почвогрунта, при этом образованные в первой фазе трещины и разломы служат концентраторами напряжений при расширении газа в почве. Газ, внедряясь в трещину, действует как клин. Раскрытие трещин происходит в основном в сторону дневной поверхности массива почвогрунта. Поэтому разрушение почвогрунта осуществляет-

ся преимущественно за счет деформаций растяжения, т. е. наименее энергоемким образом. Отдачу можно исключить, располагая выхлопные отверстия в боковых стенках зуба, а цикличность работы можно компенсировать установкой на раме орудия нескольких рыхлительных зубьев.

При обработке газодетонационными агрегатами для возделывания хлопчатника газодинамический импульс воздействует на почву как резкий короткий удар, например, строго перпендикулярно к поверхности почвы без боковых (сдвиговых) составляющих силы, что исключает сдвиг элементов корки, «выворачивание» и повреждение семян, можно обрабатывать поля с уже проросшими семенами, так как при этом не повреждаются молодые растения [16].

Борьба с вредителями и сорняками. Созданы машины для хлопкоуборки, предпосевной обработки семян и умерщвления куколок тутового шелкопряда. Применение детонационно-газовых агрегатов ГДРП-3 позволяет уменьшить количество однолетних сорняков на 50 % [16]. Прямые затраты по борьбе с сорняками примерно такие же, но созревание хлопчатника быстрее, что увеличивает его сортность. В диапазоне частот генерации детонационных волн 1÷10 Гц достигается умерщвление куколок тутового шелкопряда.

Сбор урожая. Бесконтактный принцип передачи импульса силы к каким-либо объектам открывает возможность применения газовой детонации для создания устройства сбора хлопка. Получены положительные результаты по использованию газовой детонации волны в качестве источника силы для освобождения хлопкового волокна из коробочки с дальнейшей его транспортировкой в бункер [16]. Традиционный механический принцип зацепления и вытягивания волокна из коробочки влечет за собой разрыв волокна, повреждение семян, засорение шпинделей. Созданы машины для хлопкоуборки, предпосевной обработки семян и умерщвления куколок тутового шелкопряда.

Отпугивание птиц и диких животных. Детонационно-газовое оборудование используется для защиты урожая от диких животных, что увеличивает количество собранных плодов более чем на 40 %. Несколько взрывов могут отпугнуть прочь птиц, зайцев, диких кабанов, оленей, лис, и других животных, способных нанести урон будущему урожаю или насаждениям. Одна детонационно-газовая пушка может защищать около 3 гектар, в зависимости от рельефа и размеров поля и сельскохозяйственной культуры. Оборудование может использоваться для защиты виноградников, садов, рисовых и зерновых культур, а также в аэропортах (для предотвращения попадания птиц в двигатели самолетов) и рыбных питомниках (для отпугивания птиц от воды). Оборудование применяется в более чем 45 странах мира.

Другие применения газо-детонационной обработки. Показана возможность применения газодинамического принципа воздействия на обрабатываемый материал и на других сельскохозяйственных операциях [16]: хлопкоуборка, предпосевная обработка семян, дренажирование, умерщвление куколок тутового шелкопряда.

Детонационно-газовое воздействие на почву и растения позволяет обеспечить [16]: увеличение всхожести семян растений хлопчатника и кукурузы до 15 % и уменьшить сроки полной всхожести на 2÷3 дня; сокращение срока созревания хлопчатника на 10÷14 дней вследствие ускорения развития растения на всех фазах; повышение накопления питательных веществ в частях растения (корни, листья, стебли, волокна) и за счет этого увеличение урожайности хлопчатника в среднем на 10 %; возрастание общего уровня биологической активности почвы.

Освоение неплодородных солонцовых почв, в которых прочный слой не пропускает воду и возникает заболочивание, засоление, исключается развитие корневой системы вглубь. Применение агрегатов ГДРП-3 для бурения шпуров делает почву

плодородной [16]. Цилиндрический детонационный генератор используется в качестве бура для шпуров диаметром 50 мм при использовании детонационной трубы диаметром 25 мм. Для получения шпура глубиной до 3 м необходимо применять детонацию с частотой 10 Гц.

ЖКХ. Восстановление производительности водозаборных скважин. Для восстановления дебита технологических скважин путем разрушения и диспергирования кольматирующих отложений, препятствующих притоку воды в скважины, разработан способ обработки скважин газовой детонацией, который отличается простотой, доступностью, низкой стоимостью.

Измельчение и плавление снежно-ледяной массы может происходить благодаря периодическому воздействию ударных волн, а также высокоскоростных струй горячих продуктов импульсно-детонационного горения топливной смеси, т.е. может быть использовано для быстрой утилизации снежно-ледяной массы (международный патент WO 2015/099553).

Утилизация отходов может производиться в установках, использующих детонационное сжигание топлива. Детонационная установка может быть использована для отделения резины от металлокорда в изношенных металлокордовых автопокрышках и для дробления кусков резины [3]. Существующие установки для дробления автопокрышек требуют большого расхода электроэнергии и содержат режущие части, которые необходимо периодически заменять. Принципиально новым подходом к этой проблеме является применение газовой детонации. Методика состоит в резком повышении давления внутри автопокрышки, охлажденной до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Возрастание давления вызывается взрывом способной к детонации газовой смеси. Продукты взрыва не содержат экологически опасных веществ. В процессе разрушения резина отслаивается от металла и текстильного корда. Обеспечивается отделение не менее 80 % резины от корда. За время менее

1 секунды резина разлетается на куски размером менее 5 мм. Полученная резиновая крошка после дополнительного измельчения может быть использована для производства различных изделий, например, кровельного листового материала, резиновых плит и т. д.

Тепловой привод, аналогичный машинам для «горячей» резки, использован при создании оборудования для осуществления, например, процессов, сопутствующих утилизации отработанных тепловыделяющих элементов атомных электростанций [7].

Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций. Метание тушащих веществ. Весьма актуальна проблема метания огнетушащих веществ различной массы с высокой производительностью и эффективностью на заданные расстояния с целью дистанционного тушения крупных пожаров. Разработаны установки метания тушащих веществ в контейнерах на основе газовой детонации (Харьковский политехнический институт (ХПИ)), в которых повышение энергоэффективности и дальности метания обеспечивается за счет более высокого давления в рабочей камере и снижения времени теплоотдачи при детонационном сгорании газового заряда в сравнении с установками, где реализуется медленный процесс дефлаграционного сгорания газового заряда. При метании с помощью газодетонационной установки контейнера диаметром 0,1 м, что в расчетном варианте соответствует массе 2 кг, и при начальной скорости 100 м/с максимальная дальность метания составит 1000 м (без учета сопротивления воздуха).

Локализация лесных пожаров. Показана возможность получения противопожарного разрыва с помощью ударного действия взрыва топливовоздушной смеси, формируемой в объемном шланговом заряде (Харьковский политехнический институт). В условиях проведенных исследований для зарядов диаметром от 0,95 м до 1,8 м ширина противопожарного разрыва составляла от 2,5 м до 7 м.

Тушение пожаров в зданиях. Для ликвидации развитых пожаров в зданиях разработана ранцевая установка периодически-импульсного действия газовой детонации. Ускорение и дробление воды производится продуктами газовой детонации пропано-воздушной смеси с получением мелкораспыленной водяной струи с оптимальным значением дисперсности капель воды ($60 \div 100$ мкм).

Системы принудительного спуска лавин. В 1989 году после 15 лет испытаний и экспериментов в управлении сходом лавин французская фирма T.A.S. (Альпийские Технологии Безопасности) создала и запатентовала систему Gazex, которая инициирует принудительный сход лавин, используя механизм активного воздействия детонацией смеси на основе кислорода и пропана. Такие установки используются по всему миру как для защиты склонов горнолыжных курортов, так и для защиты дорог, туннелей и жилых комплексов.

Здравоохранение. Безыгольные инъекции применяются для того, чтобы уменьшить боль и снизить повреждение тканей. Использование газовой детонации позволяет заменить менее эффективные источники энергии для ускорения лекарственных препаратов в аппаратах, предназначенных для безыгольных инъекций, на газовые смеси, что позволяет упростить, удешевить устройства для безыгольных инъекций и избежать выбросов ядовитых продуктов сгорания твердых топлив [17].

Военное дело. Разрушающее воздействие объемной детонации. Объемный взрыв (детонация) имеет место при образовании аэрозольной смеси летучих газобразных, жидких или твердых (порошковых взвесей) веществ с достаточно высокой калорийностью, которые воспламеняются случайно или с помощью детонаторов (в боеприпасах объемного взрыва). При этом в определенных условиях, зависящих в первую очередь от концентрации веществ в воздухе (в частности, углеводородных топлив), а также от ряда физико-

химических свойств и сложных газодинамических процессов перемешивания и горения, в подобном топливно-воздушном облаке может возникнуть детонационный процесс в виде взрыва, вызывающего значительные разрушения. Основным поражающим фактором боеприпасов объемного взрыва является избыточное давление во фронте ударной волны, которое при возникновении детонации в топливно-воздушном облаке достигает в его центре около 30 кг/см^2 , а в зоне детонации за несколько десятков микросекунд развивается температура $2500\div 3000 \text{ }^\circ\text{C}$. По своим параметрам (длительность затухания внутри и вне облака) избыточное давление боеприпаса объемного взрыва превосходит давление во фронте ударной волны, создаваемой обычными взрывчатыми веществами (ВВ). Топливо-воздушная смесь способна проникать в негерметичные объемы и формироваться по профилю рельефа местности, от поражающего воздействия боеприпасов объемного взрыва не защищают ни складки местности, ни полевые оборонительные сооружения.

Это оружие является средством поражения неукрытой и слабозащищенной живой силы, боевой техники на открытой местности, фортификационных и оборонительных сооружений, проделывания проходов в минных заграждениях, расчистки и подготовки временных площадок для десантирования и посадки вертолетов, разрушения зданий и подавления опорных пунктов при ведении уличных боев в городе, борьбы с противокорабельными ракетами и надводными кораблями, уничтожения растительности и посевов сельскохозяйственных культур и т. д.

Тунгусское событие по одной из научных гипотез также представляется как детонация природной объемно-детонирующей системы.

Разминирование. Для решения задачи разминирования минных полей объемным взрывом используют детонационно-способную смесь в струе отработанных газов силовой установки бронетанковой тех-

ники [18]. Данный способ разминирования по сравнению с наиболее дешёвым ручным способом обладает преимуществом по целому ряду основных показателей, таких как стоимость и производительность разминирования, степень безопасности при выполнении работ по разминированию. Например, по стоимости разминирования 1 м^2 минно-взрывного заграждения способ разминирования с применением бронетанковой техники является менее затратным в 5 раз, а по производительности превосходит ручной способ более чем в 100 раз.

Для инициирования детонации в неограниченном пространстве увеличивают интенсивность ударной волны в процессе её выхода из детонационной трубы за счет электродинамического ускорения газоплазменного потока за фронтом волны [18].

Газодетонационные огнемёты. К тенденциям, присущим локальным войнам и другим вооруженным конфликтам, относится повышение роли огнемётных устройств. В газодетонационных огнемётах как метательный заряд целесообразно использовать смесь пропан-бутана технического с кислородом в стехиометрическом соотношении.

Утилизация боеприпасов. Заряд твердого взрывчатого вещества дробят воздействием ударной волны, которую получают детонацией горючей газовой смеси, окружающей боеприпас (патент РФ № 2137089).

Прочие применения. Инициирование горения и взрыва ВВ. В научных исследованиях и технике широко применяется инициирование взрыва труднодетонирующих газовых, гетерогенных и конденсированных ВВ посредством детонационной волны (ДВ), сформированной в узкой трубке, заполненной легкодетонирующей газовой смесью. Трубку можно не закрывать мембраной. Тогда легкодетонирующую смесь можно инжектировать к электродам непосредственно перед подачей инициирующего импульса. Переход ДВ по смеси из трубки в объем является хорошо известным способом возбуждения сфери-

ческой и цилиндрической детонации. Газовой детонацией можно возбудить ударную волну (УВ) «со сшитой контактной поверхностью», что значительно удлиняет «пробку» постоянных параметров за УВ. Данный эффект можно использовать в импульсных газодинамических лазерах. ДВ, распространяющаяся по газовой смеси, способна при определенных условиях возбудить детонацию в заряде насыпного взрывчатого вещества [19].

Пережатая ДВ обеспечивает надежное инициирование промышленного детонатора, употребляемого в горном деле. Обычная электрическая схема, используемая при одновременном подрыве большого количества разнесенных зарядов, кроме опасности несанкционированного срабатывания от блуждающих электрических наводок обладает еще одним опасным свойством: при отказе какого-либо детонатора заряд оказывается в снаряженном состоянии (электродетонатор + заряд взрывчатого вещества в сборке). Это диктует необходимость обязательного устранения угрозы его срабатывания при последующих производственных операциях. Если электродетонаторы заменить газовыми, объединенными гибкой, например полихлорвиниловой, трубкой в единую протяженную и разветвленную сеть, то после заполнения системы взрывчатой газовой смесью и инициирования детонации волна, распространяясь вдоль магистралей, взорвет все заряды. При многократных испытаниях последовательной сети длиной 1 км, содержащей около сотни зарядов, не было зарегистрировано ни одного отказа. Если же какой-либо газовый детонатор откажет, то обезвредить его можно продувкой магистрали азотом или воздухом. Это эквивалентно устранению детонатора и обеспечивает безопасность при дальнейшей работе с этим зарядом.

Ускорение компактных тел. При движении «снаряда» в заполненной взрывчатой газовой смесью трубе со скоростью, превышающей скорость детонационной

волны Чепмена — Жуге D_{CJ} , смесь будет сгорать в системе отраженных косых ударных и детонационных волн, возникающих в кольцевом зазоре между «снарядом» и стенкой трубы. Можно так подобрать форму и размеры «снаряда», что он будет разгоняться (концепция прямоточного ускорителя — Ram Accelerator). Расчеты показали, что в 12-метровой трубе диаметром 38 мм, заполненной водородно-воздушной смесью под давлением 25 атм, «снаряд» массой 70 г можно разогнать до скорости 4 км/с. При скорости 3,2 км/с головная баллистическая волна является ударной, а отраженная от стенок — детонационной. При повышении скорости головная волна становится детонационной, и тяга исчезает. В экспериментах [3] получена скорость снаряда 2,1 км/с, ненамного превышающая скорость детонации.

Возможен разгон тел продуктами газовой детонации и по обычной пушечной схеме. В экспериментах вращающийся стальной диск диаметром 0,5 м и толщиной 6 мм ускорялся при детонации смеси $4\text{H}_2 + \text{O}_2$ ($D_{CJ} \cong 3,2$ км/с) до скорости 3,5 км/с на длине 60 м.

Моделирование поршня. Использование газовой детонации при моделировании получения смеси диспергированной жидкости с газом при помощи поршневой машины.

Детонационно-газовые насосы, например, насос-двигатель по а. с. СССР 383898.

Ударное воздействие, например, в импульсных горелках, совмещающих ударное воздействие с воздействием высокоскоростной струи горячих продуктов детонации. Импульсное ударное и конвективно-тепловое воздействие детонационно-газовой струи в перспективе может использоваться для дробления и газификации тяжелых фракций нефти и угля, бытовых и промышленных отходов, для дробления горных пород, льда и т. д.

Выводы:

1. Практическое применение газовой детонации охватывает почти все отрасли экономики, и детонационно-газовые тех-

нологии могут быть отнесены к имеющим межотраслевое значение.

2. Следует ожидать разработки и создания новых способов и устройств, основанных на использовании детонационного режима горения газов, в т. ч. для получения и обработки материалов, выполнения разнообразных технологических операций,

в транспортных и энергетических машинах и пр.

3. Необходим детальный анализ разработок и исследований детонационно-газовых технологий и устройств в различных сферах применения с целью обмена достижениями для более их широкого использования и внедрения.

Библиографический список

1. Янь, Х.-Х. Использование этанола для получения наноразмерного диоксида титана в процессе газовой детонации [Текст] / Х.-Х. Янь, С.-Ч. Хуан, Ш.-С. Си // *Физика горения и взрыва*. — 2014. — Т. 50. — № 2. — С. 77–80.
2. Получение наноразмерного детонационного углерода на импульсном газодетонационном аппарате [Текст] / А. А. Штерцер, В. Ю. Ульяницкий, И. С. Батраев, Д. К. Рыбин // *Письма в ЖТФ*. — 2018. — Т. 44. — Вып. 9. — С. 65–72.
3. Харламов, Ю. А. Детонационно-газовые процессы в промышленности [Текст] / Ю. А. Харламов, Н. А. Будагьянц. — Луганск : Изд-во ВУГУ, 1998. — 223 с.
4. Синтез твердосплавных материалов в технологическом процессе детонационного напыления [Текст] / С. Ю. Ганигин, И. Д. Ибатуллин, М. В. Ненашев, К. П. Якунин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. — 2013. — Т. 15. — № 4 (2). — С. 451–454.
5. Букаемский, А. А. Нанопорошок диоксида циркония. Взрывной метод получения и свойства [Текст] / А. А. Букаемский // *Физика горения и взрыва*. — 2001. — Т. 37. — № 4. — С. 129–134.
6. Borisov, E. V. Dehydration of clay in detonating gas mixtures [Text] / E. V. Borisov, O. G. Martynov, V. N. Mironov // *Heat and mass transfer-97*. — Minsk : ИТМО, 1997. — P. 69–73.
7. Импульсная резка горячего металла [Текст] / В. С. Кривцов, С. А. Мазниченко, А. Н. Застела, Т. Е. Обрываева // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2007. — № 11 (47). — С. 26–34.
8. Трифонов, О. В. Современное состояние технологии и оборудования для очистки от заусенцев детонирующими газовыми смесями и направления их совершенствования [Текст] / О. В. Трифонов // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. — 2013. — Вып. 1. — С. 115–121.
9. Планковский, С. И. Проблемы развития методов финишной отделки и очистки интенсивными тепловыми потоками [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль // *Проблемы машиностроения*. — 2011. — Т. 14. — № 2. — С. 72–82.
10. Шоршоров, М. Х. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий [Текст] / М. Х. Шоршоров, Ю. А. Харламов. — М. : Наука, 1978. — 224 с.
11. Воронин, В. Н. Технология балансировки абразивных кругов, используемых для шлифования пар трения методами детонационного напыления [Текст] / В. Н. Воронин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. — 2016. — Т. 18. — № 4 (2). — С. 237–241.
12. Система нанесения покрытий осаждением из газовой фазы в потоке продуктов газовой детонации [Текст] / С. Ю. Ганигин, А. Ю. Мурзин, О. Ю. Глазунова, П. К. Кондратенко, М. В. Ненашев, И. В. Нечаев // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. — 2014. — Т. 16. — № 1 (2). — С. 385–389.
13. Какенов, К. С. Современные методы уплотнения грунтов взрывными воздействиями. Анализ последствий аварийных взрывов [Текст] : монография / К. С. Какенов. — Караганда : КЭУ, 2012. — 361 с.
14. Зеленов, К. И. Мелкозернистые цементные бетоны ударно-волнового уплотнения [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Зеленов Константин Иванович ; Моск. гос. открытый ун-т. — М., 2006. — 195 с.

15. Семернин, А. Н. Автоматизация процесса очистки фильтрующих устройств на базе газо-детонационного оборудования [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Семернин Андрей Николаевич ; БелГТАСМ. — Белгород, 2000. — 220 с.

16. Тожиев, Р. Ж. Механико-технологические решения бесконтактного воздействия на почву и растения с разработкой газодетонационных агрегатов для высокоэффективного возделывания хлопчатника [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р. Ж. Тожиев. — М., 1993. — 38 с.

17. Применение детонации водородовоздушной смеси в устройствах для безыгольной инъекции [Текст] / В. В. Голуб, Т. В. Баженова, Д. И. Бакланов, К. В. Иванов, М. С. Кривокорытов // Теплофизика высоких температур. — 2013. — Т. 51. — Вып. 1. — С. 147–150.

18. Сиротенко, А. Н. Создание детонационно-способной смеси в газовой струе с приложением для разминирования минных полей [Текст] / А. Н. Сиротенко, А. Н. Довбня, О. В. Стаховский, К. В. Корытченко / Механіка та машинобудування. — 2006. — № 1. — С. 166–177.

19. Лукьянчиков, Л. А. Системы иницирования на вторичных взрывчатых веществах [Текст] / Л. А. Лукьянчиков // Прикладная механика и техническая физика. — 2000. — Т. 41. — № 5. — С. 48–61.

© Харламов Ю. А.

© Петров П. А.

© Козачишен В. А.

© Изыумов Ю. В.

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

Статья поступила в редакцию 31.03.2022.

**Doctor of Technical Sciences Kharlamov Yu. A., PhD in Engineering Petrov P. A., PhD in Engineering Kozachishen V. A., PhD in Engineering Izyumov Yu. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)
DETONATION-GAS TECHNOLOGIES AND DEVICES: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT. REPORT 3. APPLICATION OF GAS DETONATION IN PROCESSING AND MAINTAINING ECONOMIC BRANCHES**

The third report briefly describes the use of detonation-gas technologies and devices in chemical, petrochemical industry, mechanical engineering and metal working, building and construction materials production, agriculture and forestry, house and communal services, for the purpose of prevention and relief of emergency situations, in military affair and etc.

Key words: *needleless injections, detonation-gas technologies, detonation synthesis, pulse processing, throwing of extinguishing substances, processing of dispersed particles, large detonation, cleaning-out, resulting substances, deburring.*

УДК 621.876.212

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

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОРЯДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

Исследовано напряженно-деформированное состояние многорядных механических соединений типа Flexco резиноканевых конвейерных лент в программном комплексе ANSYS Workbench для разработки рекомендаций по их совершенствованию. Полученные результаты исследования показали, что нагрузка в многорядном механическом соединении типа Flexco Rivet Hinged распределяется крайне неравномерно. Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск конструктивных решений и выбор параметров МС, обеспечивающих равномерное нагружение всех элементов конвейерной ленты.

Ключевые слова: конвейерная лента, механическое соединение, моделирование, напряженно-деформированное состояние, заклепка.

Эффективность работы ленточных конвейеров во многом зависит от технического состояния ленты, в первую очередь от состояния стыковых соединений. До 70 % простоев ленточных конвейеров связано с восстановлением стыковых соединений ленточных конвейеров. Более 50 % аварий на шахтах случаются из-за разрыва стыковых соединений ленточных конвейеров [1].

Согласно требованиям отраслевого стандарта, прочность механических соединений (МС) должна быть не ниже 60 % от агрегатной прочности ленты [2]. Однако практика показывает, что относительная прочность и долговечность механических стыков в среднем составляют: для заклепочных соединений внахлест соответственно 39 % и 13 %, для шарнирных стыков с крючкообразными скобами — 51 % и 19 %, с П-образными скобами — 77 % и 35 % [3]. Очевидно, наиболее совершенными являются шарнирные МС с П-образными скобами, из которых наибольшее распространение получили соединения типа Flexco.

Недостаточный, в большинстве случаев, запас прочности и долговечности МС резиноканевых конвейерных лент указывает на необходимость их исследования и раз-

работки более эффективных конструкций, а также оптимизации их конструктивных параметров.

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния многорядных механических соединений типа Flexco резиноканевых конвейерных лент в программном комплексе ANSYS Workbench для разработки рекомендаций по их совершенствованию.

Геометрическая модель многорядного механического соединения типа Flexco, разработанная в программном комплексе ANSYS Workbench, представлена на рисунке 1.

Компьютерная модель ленты представляется в виде слоистой композиции из тканевых прокладок, резиновых прослоек и обкладок. Тканевые прокладки представлены упругими ортотропными телами, а резиновые прослойки и обкладки — упругими изотропными телами. Концы ленты соединяются набором шарнирных соединителей, способных поворачиваться относительно тросика, на котором они набираются. Основными элементами шарнира являются две абсолютно жесткие охватывающие ленту пластины и стягивающие их цилиндрические стержни, которые

имитируют соединители МС — заклепки или болты. В процессе заклепывания или затягивания соединителей в каждом шарнире обеспечивается некоторый «прессовый эффект», благодаря которому, по крайней мере, на начальном этапе эксплуатации стыков возникают силы сцепления металлических пластин МС с поверхностью ленты, что снижает нагрузки на соединители и прокладки ленты. На свободный конец ленты действует равномерно распределенная по всей ширине ленты растягивающая сила.

Принимается лента 800 EP-800/4-5+2, имеющая следующие характеристики: ширина ленты $B = 0,8$ м; число тканевых прокладок $n = 4$, толщина $\delta_n = 1,2$ мм; толщина резиновых прослоек (сквиджей) $\delta_c = 0,5$ мм; модули упругости тканевой прокладки по осям x , y и z — $E_x = 3 \cdot 10^8$ Па, $E_y = 6 \cdot 10^7$ Па, $E_z = 6 \cdot 10^7$ Па; модули сдвига по осям x , y и z — $G_x = 2,85 \cdot 10^8$ Па, $G_y = G_z = 1,14 \cdot 10^8$ Па; коэффициент Пуассона резины — $\mu_p = 0,4$, тканевой прокладки по основе — $\mu_{тo} = 0,275$, по утку — $\mu_{тy} = 0,135$; прочность тканевых прокладок по основе $[\sigma_x]$ — 166,7, по утку $[\sigma_y]$ — 45,8 МПа.

Резиновые обкладки и прослойки ленты представляются в виде двухпараметрической модели Муни — Ривлина, которая обычно используется для описания гиперупругих материалов. Модель определяется коэффициентами $C10$ и $C01$ в зависимости «напряжение — деформация». Значения коэффициентов получены расчётным путём на основании известных экспериментальных зависимостей «нагрузка — деформация». Установлено: $C10 = 0,66$ МПа, $C01 = 0,324$ МПа.

Тип механического соединения — RivetHingedR5 $\frac{1}{2}$ с тремя рядами заклепок (см. рис. 1) диаметром $d = 4,2$ мм. В первом и третьем рядах — отсчет ведется от торца ленты — число заклепок $z_1 = z_3 = 32$, во втором ряду — $z_2 = 16$.

Натяжение ленты в направлении оси x принимается равным номинальному значению

$$S = Bn[\sigma_x] / n_{н.з}, \quad (1)$$

где $n_{н.з}$ — нормативный запас прочности ленты.

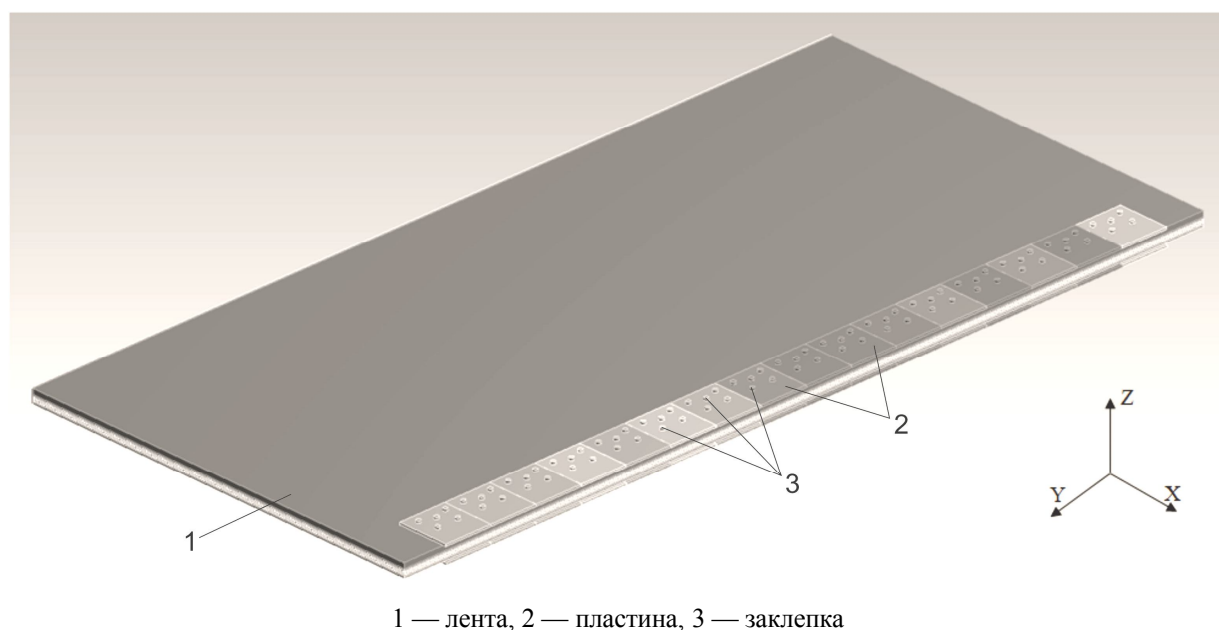


Рисунок 1 Геометрическая модель механического соединения конвейерных лент

В результате моделирования определяются нормальные и касательные напряжения на площадках, нормальных к осям x , y и z локальной системы координат.

На рисунках 2, 3 и 4 отражена картина распределения нормальных напряжений в прокладках ленты вокруг среднего по ширине ленты замка МС. В результате моделирования установлено, что все четыре прокладки нагружаются практически равномерно, наибольшей нагрузке подвергается третий со стороны торца ленты ряд заклепок (рис. 2). Максимальные напряжения $\sigma_{x \max}$ до 56,7 МПа наблюдаются на поверхности отверстий в верхней прокладке.

Во втором ряду заклепок нагрузка так же, как и в первом, распределяется равномерно по всем четырем прокладкам. При этом максимальное напряжение составляет 43,4 МПа.

Наименьшей нагрузке подвержен первый ряд МС, в котором максимальное напряжение составляет 13,4 МПа.

Коэффициент концентрации напряжений и коэффициент запаса прочности ленты по основе необходимо определять для наиболее ослабленного отверстиями и в то же время наиболее напряженного сечения ленты в третьем ряду заклепок МС.

Коэффициент концентрации напряжений определяем по следующей формуле:

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

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

Расчетное среднее нормальное напряжение в прокладке

$$\sigma_{x \text{ ср}} = \frac{S}{\delta_{\text{п}} n (B - z_1 d)}, \quad (3)$$

$$\sigma_{x \text{ ср}} = \frac{64}{1,2 \cdot 4(800 - 32 \cdot 4,2)} = 20 \text{ МПа.}$$

В данном случае $k_x = 2,8$.

Фактический коэффициент запаса прочности прокладки по основе

$$n_{x.z} = [\sigma]_x / k_x \sigma_{x \text{ ср}} = 166,7 / 2,8 \cdot 20 = 3. \quad (4)$$

Полученное в рассматриваемом типичном случае значение коэффициента запаса прочности прокладки значительно ниже нормативного значения запаса прочности $n_{н.з}$, который обычно принимается равным 8...10.

На рисунке 5 отображена картина распределения нормальных напряжений σ_y в прокладке ленты по утку. Прокладки, как и по основе, нагружаются практически равномерно. Максимальные напряжения $\sigma_{y \max}$ возникают в верхней прокладке третьего ряда отверстий и составляют 40,9 МПа.

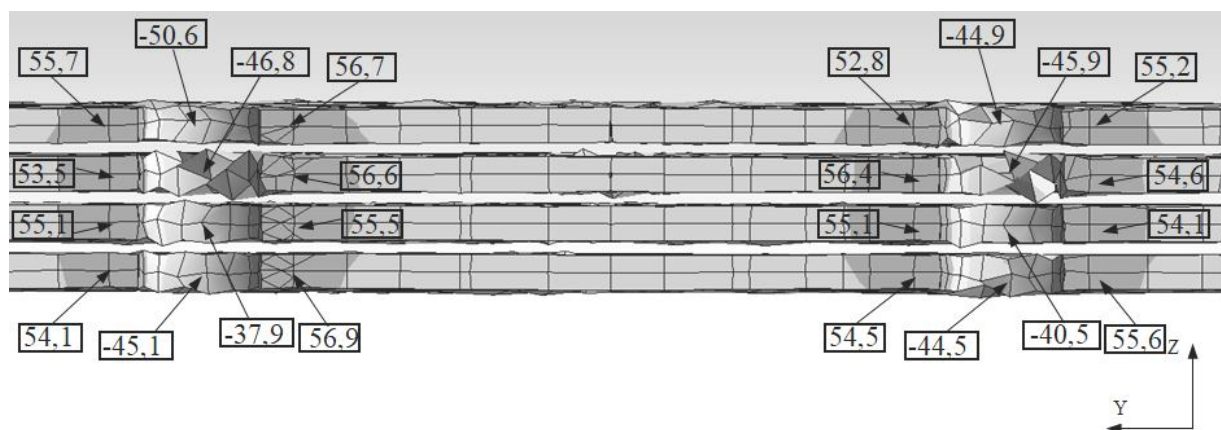
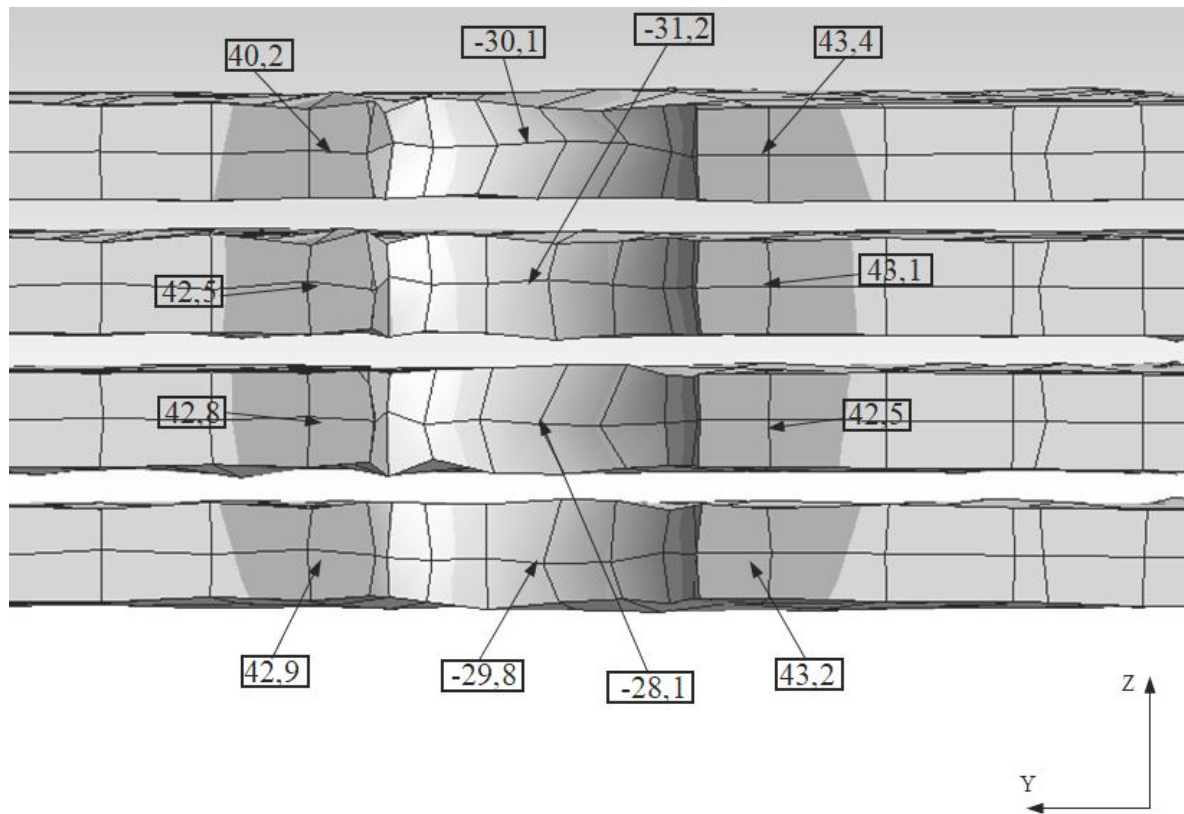
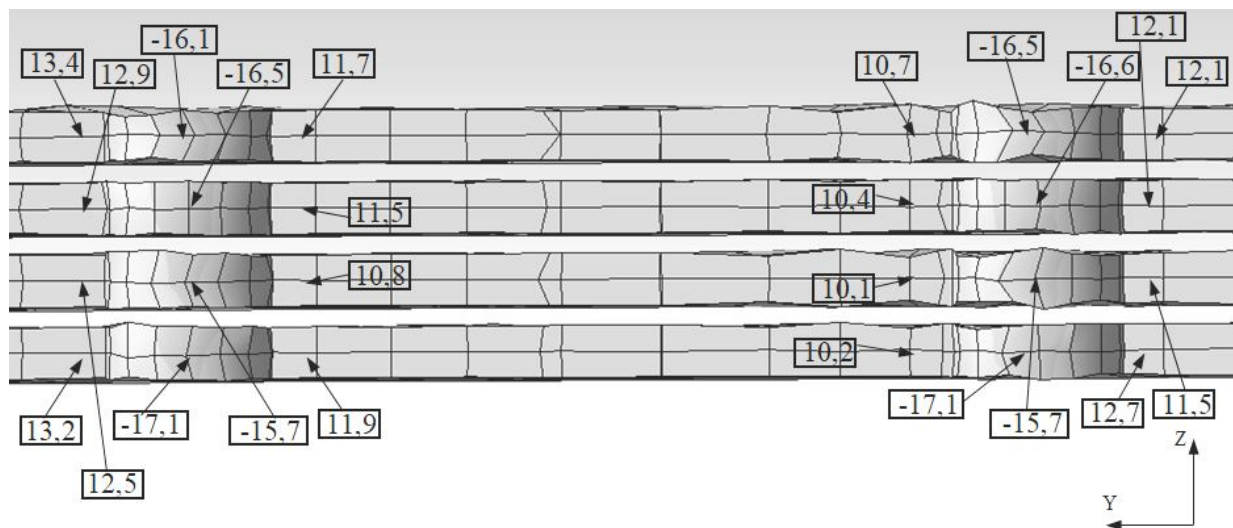


Рисунок 2 Распределение напряжений σ_x в ленте вокруг заклепок МС третьего ряда

Рисунок 3 Распределение напряжений σ_x вокруг заклепок МС второго рядаРисунок 4 Распределение напряжений σ_x вокруг заклепок МС первого ряда

Фактический коэффициент запаса прочности прокладки по утку в этом же сечении

$$n_y = [\sigma]_y / \sigma_{y \max} = 45,8 / 40,9 = 1,1. \quad (5)$$

Неравномерное распределение нагрузок между рядами МС снижает его прочность.

Выравнивание нагрузок путем изменения геометрических параметров стыка (диаметра и шага установки заклепок, расстояния между рядами заклепок и т. д.) позволит повысить прочность и долговечность МС.

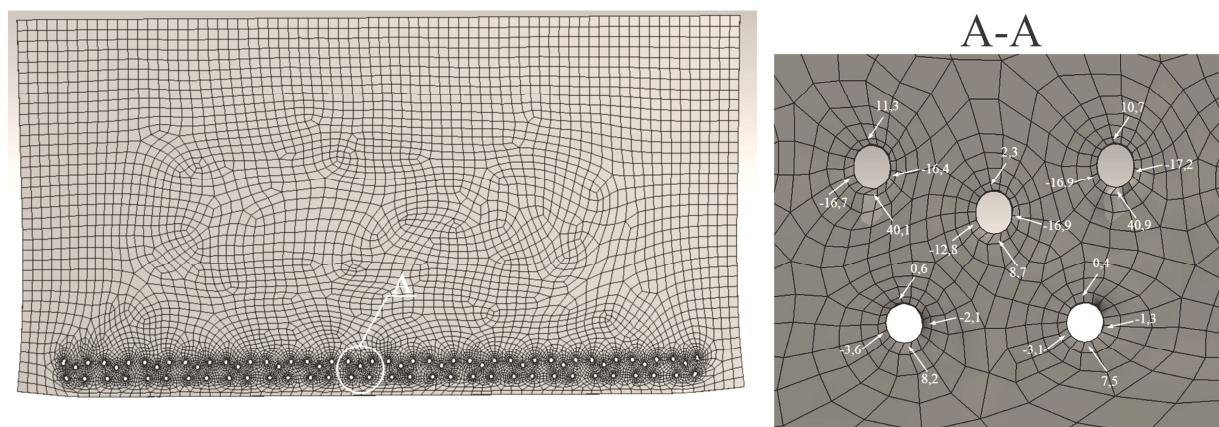


Рисунок 5 Распределение напряжений σ_x в верхней прокладке ленты вокруг центрального замка МС

Наибольшей нагрузке как по основе (σ_x), так и по утку (σ_y) подвергаются прокладки ленты вокруг заклепок третьего, со стороны торца, ряда МС. Максимальные напряжения возникают на поверхности отверстий в верхней прокладке ленты и составляют по основе 56,7 МПа, что примерно в 1,3 раза больше напряжений вокруг заклепок второго ряда и в 4 раза больше напряжений вокруг заклепок первого ряда. Напряжения по утку составили 40,9 МПа.

Фактический коэффициент запаса прочности прокладок по основе, рассчи-

тываемый для наиболее напряженного (слабейшего) сечения ленты, равен 3, а по утку — 1,1, что значительно ниже нормативных значений.

Полученные результаты исследования показали, что нагрузка в многорядном механическом соединении типа Flexco Rivet Hinged распределяется крайне неравномерно. Дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск конструктивных решений и выбор параметров МС, обеспечивающих равномерное нагружение всех элементов конвейерной ленты.

Библиографический список

1. Киселев, Б. Р. Ленточный конвейер. Расчет и проектирование основных узлов [Текст] : учеб. пособ. / Б. Р. Киселев, М. Ю. Колобов. — И. : ИГХТУ, 2019. — 179 с.
2. ГОСТ Р 58205–2018. Определение прочности механических соединений резиноканевых конвейерных лент. Методы статических испытаний. — Введ. 2019-01-01. — М. : Стандартинформ, 2018. — 7 с.
3. Скворцов, А. М. Совершенствование стыковки конвейерных лент [Текст] / А. М. Скворцов, Б. А. Кроль, В. В. Шконда // Шахтный и карьерный транспорт. — М. : Неора, 1983. — Вып. 8. — С. 26–30.

© Корнеев С. В.
 © Доброногова В. Ю.
 © Коваленко О. А.
 © Захаров О. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТИ Денищенко П. Н.,
 к.т.н., доц., зав. каф. ЭиТС СИПИМ ЛГУ им. В. Даля Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 19.04.2022.

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

STUDYING THE STRESS-STRAIN STATE OF MULTI-ROW MECHANICAL JOINTS OF CONVEYOR BELTS

Studying the stress-strain state of multi-row mechanical joints of the “Flexco” type of fabric-ply conveyor belts in the ANSYS Workbench software package to develop recommendations for their improvement. The study results showed that the load in a multi-row mechanical joint of the “Flexco” Rivet Hinged type is distributed extremely unevenly. Further research should be aimed at finding constructive solutions and choosing MS parameters that ensure uniform loading of all elements of conveyor belt.

Key words: conveyor belt, mechanical joint, modeling, stress-strain state.

УДК 669.02/.09:004.422.422:159.9.078

д.т.н. Вишневский Д. А.,
Бондарь Н. А.,
Гайдар А. И.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ, УТОМЛЯЕМОСТИ И ОШИБАЕМОСТИ ОПЕРАТОРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ С УЧЕТОМ УПРАВЛЯЕМЫХ И НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ФАКТОРОВ

Разработана модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости оператора с учетом управляемых и неуправляемых факторов; также разработана модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости, ошибаемости оператора и вероятности отказа металлургического оборудования. Разработаны шкалы оценки факторов, влияющих на качественное изменение показателей работоспособности — X , утомляемости — Y и ошибаемости — Z в процессе работы оператора. Разработанные взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости в виде графа представлены в непрерывной форме в виде систем дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: человеческий фактор, отказы машин, работоспособность, утомляемость, ошибаемость, отказ металлургического оборудования.

Человеческий фактор (ЧФ) оказывает значительное, а в иных случаях — и определяющее, влияние на создание аварийных ситуаций при эксплуатации металлургического оборудования, которое в большинстве случаев представляет собой сложные технические системы (СТС) [1–3].

СТС не могут нормально функционировать без такого важного звена, как человек. Согласно изученной литературе, около 40 % отказов различных технических систем прямо или косвенно связано с ЧФ, а 20 % — напрямую с человеком [4–6]. В этой связи актуально создание моделей оценки изменения надежности металлургического оборудования (детерминистских, статистических, вероятностных, имитационных и др.), в которых наряду с параметрами надежности технических узлов и систем, входящих в СТС, представлены показатели, связанные с ЧФ, влияющие на общую надежность системы.

При дальнейшем развитии подхода, сформулированного в [7], необходимо также учесть другие ограничивающие факторы, которые предлагаем разделить на две

группы: неуправляемые факторы внешней среды, например время суток и года, и управляемые факторы. В качестве последних в модели учитываются в виде соответствующих коэффициентов следующие факторы: психофизические факторы соответствия качеств работника требованиям профессии; состояние здоровья; рациональность конструкции рабочего места оператора; скорость изменения производства за счет инноваций; возраст и опытность оператора; санитарно-гигиенические и климатические условия работы; рациональность режима труда и отдыха работника и др.

Часть перечисленных факторов может быть введена в модель в виде динамических показателей психофизического состояния оператора, которые замеряются и поступают в модель в виде функций от времени. Все коэффициенты, используемые в модели для корректировки исходных параметров, также приведены к унифицированным шкалам (табл. 1).

На рисунке 1 отражено взаимовлияние показателей-переменных X , Y , Z , а также направление воздействия и точки приложе-

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

ния факторов организации внутренней среды производства и некоторых внешних факторов среды. Схема организована в виде ориентированного графа, где вершинами

являются показатели X, Y, Z, направление дуг указывает в сторону показателя, на который оказывается влияние, а знак дуги отражает прямую (+) или обратную (–) связь.

Таблица 1

Шкалы оценки факторов, влияющих на качественное изменение показателей работоспособности — X, утомляемости — Y и ошибаемости — Z в процессе работы оператора

Интервал всех значений фактора	Классы интервалов разбиения корректирующих коэффициентов для учета их в математической модели		
	Класс С	Класс В	Класс А
[0, 1]	[0, 0.3]	(0.3, 0.7]	(0.7, 1]
Факторы	Описание классов для данного фактора		
E1 — психофизические факторы соответствия качеств работника требованиям профессии	Плохо соответствует	Средняя степень соответствия	Хорошее соответствие
E2 — рациональное устройство рабочего места	Нерациональное	Рациональное	Рационально на высоком уровне
E3 — скорость изменения производства за счет инноваций	Очень быстро	Быстро	Умеренно
E4 — молодость работника, его физическая выносливость	Немолод, физически не подготовлен	Средняя степень соответствия	Молод, физически вынослив
E5 — опытность работника	Опыта нет или очень мало	Достаточно опытен	Очень опытен
E6 — образовательный уровень работника	Минимальное образование	Средняя степень соответствия	Образование по профилю
E7 — санитарно-климатические условия работы	Плохие	Нормальные	Хорошие
E8 — коэффициент сезона года	Плохо способствует нормальной работе	Средне способствует нормальной работе	Хорошо способствует нормальной работе
E9 — коэффициент времени суток	Плохо способствует нормальной работе	Средне способствует нормальной работе	Хорошо способствует нормальной работе
E10 — рациональные условия организации режима труда и отдыха	Плохо способствует нормальной работе	Средне способствует нормальной работе	Хорошо способствует нормальной работе
E11 — степень модернизации производства с уклоном в производственную безопасность	Низкая степень модернизации	Средняя степень модернизации	Высокая степень модернизации
E12 — внешние факторы среды, влияющие на работу оператора (атмосферное давление, солнечная активность и др.)	Плохо способствует нормальной работе	Средне способствует нормальной работе	Хорошо способствует нормальной работе

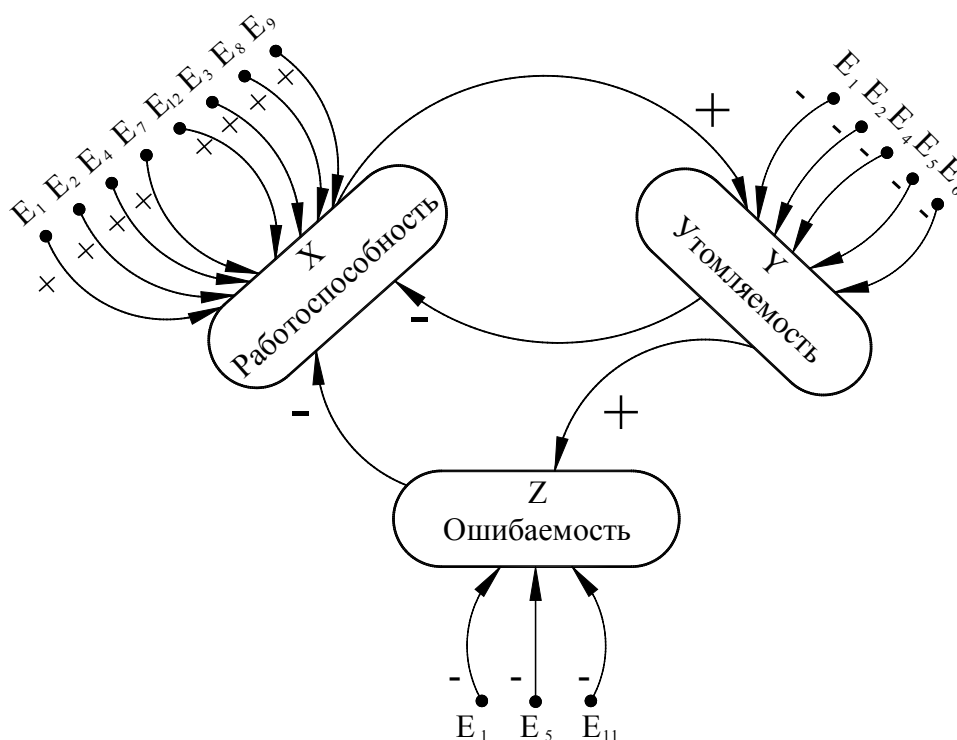


Рисунок 1 Граф связей функциональных характеристик оператора и влияющих факторов производства и внешней среды

Модель 3 соответствующая схеме рисунка 1, представлена в непрерывной форме в виде систем дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \tilde{a}_1 \frac{x}{d_1x + c_1} \cdot \left(1 - \frac{x}{\tilde{k}_1}\right) - \tilde{b}_1xy - \tilde{h}_1xz; \\ \frac{dy}{dt} = \tilde{a}_2 \frac{y}{d_2y + c_2} \cdot \left(1 - \frac{y}{\tilde{k}_2}\right) + \tilde{b}_2xy; \\ \frac{dz}{dt} = \tilde{a}_3 \frac{z}{d_3z + c_3} \cdot \left(1 - \frac{z}{\tilde{k}_3}\right) + \tilde{b}_3yz. \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия системы:

$$x_0 = x(0), y_0 = y(0), z_0 = z(0).$$

Параметры \tilde{a}_i , \tilde{b}_i , \tilde{k}_i , \tilde{h}_i являются скорректированными параметрами модели при помощи дополнительных коэффициентов, соответствующих текущему состоянию ограничивающих факторов (табл. 1); остальные коэффициенты системы (1) равны соответствующим коэффициентам системы (2):

$$x_0 = x(0), y_0 = y(0), z_0 = z(0). \quad (2)$$

Общий вид перехода от параметров a_i , b_i , k_i , h_i к скорректированным представлен формулами (3–5).

$$\begin{cases} \tilde{a}_i = f_{a_i}(a_i, e_1, \dots, e_{12}); \\ \tilde{b}_i = f_{b_i}(b_i, e_1, \dots, e_{12}); \\ \tilde{k}_i = f_{k_i}(k_i, e_1, \dots, e_{12}); \\ \tilde{h}_i = f_{h_i}(h_i, e_1, \dots, e_{12}), \\ i = 1, 2, 3. \end{cases} \quad (3)$$

Модель является основной для анализа функциональных характеристик человека-оператора и влияющих на них факторов, а также для предварительной оценки и подбора оптимальных управляемых параметров производства, которые обеспечивали бы безопасность оператора и надежную работу управляемых им систем.

Система (1) представляет собой логико-математическую часть модели. Для нахождения ее решения используются подходы

имитационного моделирования с применением соответствующего программного обеспечения.

По классификации задач, решаемых имитационными моделями, модель относится к классу «Системная динамика». В настоящее время для решения задач системной динамики используются такие программные пакеты, как VenSim, iSink, PowerSim, AnyLogic и др. [8].

В данной работе имитационное моделирование выполняется с помощью инструмента AnyLogic, который, являясь разработкой отечественных программистов, имеет все средства для создания и реализации в его среде имитационной модели, анализа модели на чувствительность к изменению параметров, устойчивость решения и визуализации результатов моделирования [8, 9].

Модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости, ошибаемости оператора и вероятности отказа металлургического оборудования (модель 4) является объединением моделей 1 и 2 [7]. Наиболее проблемной частью при объединении моделей является связывание ошибаемости оператора (показатель X) и вероятностей ошибочных действий оператора $P_{ч1}, P_{ч2}, \dots, P_{чn}$.

Запишем вероятности ошибочных действий оператора в виде вектора:

$$\bar{P}_ч = \{P_{ч1}, P_{ч2}, \dots, P_{чn}\}. \quad (4)$$

Модель 1 оперирует с вектором вероятностей $\bar{P}_ч$, а в модели 2 понятие ошибаемости оператора используется безотносительно вида ошибочного действия [7].

Очевидно, что обе величины (вероятность ошибочного действия и показатель ошибаемости оператора) обусловлены одной причиной — ошибкой человека (ЧФ), имеют одинаковое направление, даже имеют одинаковые шкалы измерения [0, 1], однако по происхождению разные. Вероятность ошибочного действия оператора определяется, как правило, статистически с использованием аппарата математической

статистики, а показатель ошибаемости — на основании качественных представлений, зависит от времени работы оператора и находится из решения системы уравнений (2).

Очевидно, что показатель ошибаемости может быть разным для разных действий оператора, поэтому введем вектор ошибаемости, компоненты которого соответствуют разным видам ошибок:

$$\bar{Z}(t) = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)\},$$

где нумерация координат соответствует принятой в модели 1 для вероятностей из группы «Человеческий фактор» [7].

Логично предположить, что векторы $\bar{P}_ч$ и \bar{Z} связаны положительной корреляционной зависимостью линейной или криволинейной формы. Для выявления такой зависимости для вектора \bar{Z} берутся компоненты, усредненные за некоторый промежуток времени t или соответствующие начальным условиям z_{i0} модели 2 [7].

Тогда модель 2 можно расширить, используя вместо одного показателя Z вектор из n компонент \bar{Z} , начальные приближения для которых берутся из вектора вероятностей $\bar{P}_ч$, с корректировкой на коэффициент масштаба k_z . Таким образом, $\bar{Z} = k\bar{P}_ч$.

В результате модель 3 может быть представлена следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \tilde{a}_1 \frac{x}{d_1x + c_1} \cdot \left(1 - \frac{x}{\tilde{k}_1}\right) - \tilde{b}_1xy - \tilde{h}_1xz; \\ \frac{dy}{dt} = \tilde{a}_2 \frac{y}{d_2y + c_2} \cdot \left(1 - \frac{y}{\tilde{k}_2}\right) + \tilde{b}_2xy; \\ \frac{dz_1}{dt} = \tilde{a}_{31} \frac{z_1}{d_{31}z_1 + c_{31}} \cdot \left(1 - \frac{z_1}{\tilde{k}_{31}}\right) + \tilde{b}_{31}yz_1; \\ \frac{dz_2}{dt} = \tilde{a}_{32} \frac{z_2}{d_{31}z_2 + c_{32}} \cdot \left(1 - \frac{z_1}{\tilde{k}_{32}}\right) + \tilde{b}_{32}yz_2; \\ \dots \\ \frac{dz_n}{dt} = \tilde{a}_{3n} \frac{z_n}{d_{3n}z_n + c_{3n}} \cdot \left(1 - \frac{z_n}{\tilde{k}_{3n}}\right) + \tilde{b}_{3n}yz_n. \end{cases} \quad (5)$$

Начальные условия системы (5) имеют вид:

$$x_0 = x(0), y_0 = y(0), z_{10} = z_1(0), \dots, z_{n0} = z_n(0).$$

Оценка вероятности отказа металлургического оборудования с учетом технического фактора и человеческого фактора определяется по формуле

$$R = f(p_{c1}, p_{c2}, \dots, p_{cn}, p_{T1}, p_{T2}, \dots, p_{Tm}) \quad [7]$$

с учетом коррекции для вероятностей, соответствующих человеческому фактору, выполненной с использованием решений системы (5).

Выводы. Основная задача, решаемая данной моделью, — это прогноз динамики изменения факторов, влияющих на функ-

циональные характеристики оператора металлургического оборудования, в результате чего оператором может быть совершена ошибка, приводящая к выходу из строя всей системы. В качестве таких функциональных характеристик были выбраны факторы: работоспособность (X), утомляемость (Y) и ошибаемость (Z) оператора в течение рабочего дня.

В дальнейшей работе необходимо произвести расчет оценки влияния человеческого фактора в аварийной ситуации при эксплуатации пневмосистемы манипулятора и механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш» с учетом технических и человеческих факторов.

Библиографический список

1. Доброборский, Б. С. *Безопасность машин и человеческий фактор [Текст] : монография / под ред. С. А. Волкова. — СПб. : СПбГАСУ, 2011. — 111 с.*
2. Вишневский, Д. А. *Анализ влияния «человеческого фактора» на надежность металлургического оборудования [Текст] / Д. А. Вишневский, Б. А. Сахаров // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — Вып. 12 (55). — С. 97–104.*
3. Руу, Р. *Human reliability analysis methods for probabilistic safety assessment [Text] / Pekka Ruu. — Espoo : Technical Research Centre of Finland (VTT), 2000. — 63 p.*
4. Вишневский, Д. А. *Влияние организационных факторов на надежность металлургического оборудования // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование : сб. науч. тр. 4-й междунар. молодеж. науч.-практ. конф. — Курск : Университетская книга, 2017. — Т. 1. — С. 146–149.*
5. *Зарубежный опыт проведения профессионального отбора // Охрана труда. Зарубежный опыт : экспресс-информация / ВНИИ охраны и экономики труда. — М., 2009. — Вып. 3. — С. 3–25.*
6. Сулейманов, М. Г. *Оценка надежности персонала при профессиональном отборе кадров в металлургии [Текст] / М. Г. Сулейманов, Л. Ш. Абдуллина // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. — 2014. — № 3. — С. 73–78.*
7. Вишневский, Д. А. *Математическое моделирование взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости человека-оператора при эксплуатации металлургических машин и агрегатов [Текст] / Д. А. Вишневский, А. Л. Сотников, Н. А. Бондарь // Инновационные перспективы Донбасса : материалы 7-й междунар. науч.-практ. конф. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2021. — С. 107–112.*
8. Куприяшкин, А. Г. *Основы моделирования систем [Текст] / А. Г. Куприяшкин ; Норильский индустр. ин-т. — Норильск : НИИ, 2015. — 135 с.*
9. Боев, В. Д. *Моделирование в среде AnyLogic [Текст] / В. Д. Боев. — М. : Юрайт, 2017. — 298 с.*

© Вишневский Д. А.

© Бондарь Н. А.

© Гайдар А. И.

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

Статья поступила в редакцию 30.05.2022.

Doctor of Technical Sciences Vishnevskiy D. A., Bondar N. A., Gaidar A. I. (DonSTI, Alchevsk, LPR)
**MATHEMATICAL MODELING OF INTERRELATION BETWEEN THE OPERABILITY,
FATIGUE AND ERROR RATE OF THE METALLURGICAL INDUSTRY OPERATOR,
CONSIDERING THE CONTROLLED AND UNCONTROLLED FACTORS**

A model of interrelation between the operability, fatigue and operator's error rate has been developed, considering the controlled and uncontrolled factors, and a model of interrelation between the operability, fatigue, operator's error rate and the probability of failure of metallurgical equipment has also been developed. Scales of evaluation of factors affecting the qualitative change in performance indicators — X , fatigue — Y and error rate — Z during the operator's work have been developed, as well. The developed interrelation of operability, fatigue and error rate in a graph form are presented in continuous form as a differential equations systems.

Key words: *human factor, machine failures, operability, fatigue, error rate, metallurgical equipment failures.*

УДК 621.873.12

*Прудченко Д. О.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
д.т.н. Сидоров В. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, evo2008@bk.ru)*

КОЛЕБАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЗАВАЛОЧНЫХ КРАНОВ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Показаны возможности оценки состояния металлоконструкций литейных, в частности завалочных кранов, электросталеплавильного производства на основе анализа колебаний главных балок, возникающих при разгрузке бады. Эксперименты выполнены на лабораторной модели.

Ключевые слова: металлоконструкции, завалочный кран, колебания, техническое состояние.

В настоящее время в промышленности наблюдается изношенность технологического оборудования, участились случаи техногенных аварий и катастроф, поэтому актуальным является обеспечение безопасной эксплуатации ответственных сварных конструкций. К технологическому оборудованию помимо станков и транспорта относят и мостовые краны, которые являются главным звеном в транспортной цепочке производства. От технического состояния мостового крана зависит не только нормальное осуществление технологических процессов, но и безопасность труда персонала. На долю мостовых кранов приходится приблизительно 38 % грузоподъемных механизмов. При работе кранов износу подвергаются силовое оборудование (двигатели, лебёдки, передачи) и сварные металлоконструкции, у большинства которых истек нормативный срок службы.

В соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (от 20 июня 1997 года) к данной категории относят объекты, использующие стационарно установленные грузоподъемные механизмы. Обеспечение безопасности кранов производится разными средствами. Применительно к приводам и системам управления — дублирование, к стальным канатам и быстроизнашивающимся деталям — периодическая замена. Наиболее ответственной частью крана, которая не подлежит

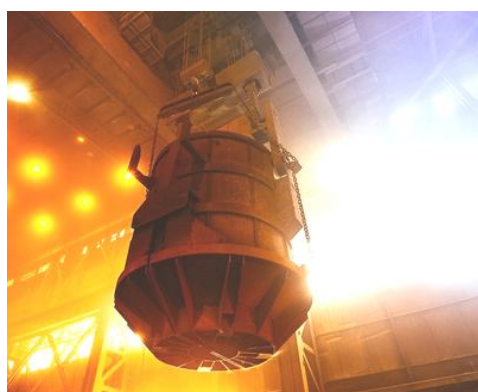
дублированию или замене, является металлическая конструкция крана. Её разрушение может привести к значительному материальному ущербу, т. е. она обеспечивает безопасность крана. Причиной аварий и разрушений металлоконструкций мостовых кранов являются дефекты в элементах конструкции. При этом разрушение сварных соединений приводит приблизительно к 90 % всех случаев разрушения машиностроительных конструкций.

Как показал опыт эксплуатации подъемно-транспортного оборудования, к окончанию нормативного срока службы примерно у 80 % всех кранов не исчерпан остаточный ресурс металлоконструкций. Можно заключить, что нормативный срок службы не ограничивает работоспособность грузоподъемного крана, а для его дальнейшей и безаварийной работы требуется решение задачи ремонта металлоконструкций. Около трети аварий мостовых кранов связаны с их техническим состоянием и происходят из-за усталостных повреждений (образования макроскопических трещин) несущих элементов металлоконструкций кранов.

Специфические условия работы завалочных (литейных) мостовых кранов электросталеплавильного производства связаны с загрузкой печи при раскрытии челюстей бады (рис. 1). Сложность данной операции заключается во временной ограниченности технологического цикла, не-

достаточной обзорности места выгрузки, воздействию высоких температур и восходящего пылевого потока. Выгрузка металлолома должна проводиться максимально быстро, при этом возникает динамическое воздействие от снижения нагрузки в канатах полиспаста, что вызывает колебания главных балок моста крана. Учитывая повышенные требования к надёжной работе литейных кранов, на что указывается в нормативных документах [1, 2] и работах [3–5 и др.], предлагается использовать выгрузку металлолома из бадьи как тестовое воздействие на металлоконструкции.

Металлоконструкции испытывают действие циклических нагрузок, приводящих к появлению усталостных трещин, в местах соединения главных и торцевых балок, в шарнирах балансиров и др. Безотказность применения литейных кранов грузоподъёмностью 110...450 т лимитируется состоянием металлоконструкций.



а



б

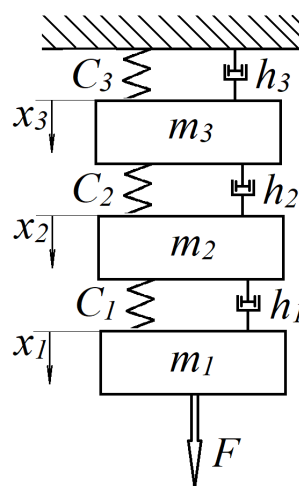
Рисунок 1 Бадья перед загрузкой (а) и над электродуговой печью (б)

Известно, что состояние объекта диагностирования можно оценить по результату выполнения возложенных на него функций (функциональное диагностирование) или по реакции создаваемого внешнего воздействия на объект диагностирования (тестовое диагностирование). Возможность использования такого тестового воздействия, как разгрузка бадьи, для измерения параметров колебаний и оценки состояния металлоконструкций литейного крана рассматривается в статье.

Общий вид крана и расчётная модель при поднятой траверсе бадьи с металлоломом показаны на рисунке 2.



а



б

Рисунок 2 Общий вид крана (а) и расчётная схема (б)

Колебательные процессы рассматриваемой системы (рис. 2) могут быть представлены уравнением движения:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + C_1 x_1 + \\ + m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + C_2 x_2 + \\ + m_3 \ddot{x}_3 + h_3 \dot{x}_3 + C_3 x_3 = F. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом приняты следующие обозначения:

m_1 — масса траверсы, бадьи и металлолома;

m_2 — масса тележки механизма главного подъёма;

m_3 — масса главных балок крана;

C_1 — жёсткость полиспаста, которая зависит от высоты подъёма:

$$C_1 = \frac{E_k F_k}{L_k} a^2 U^2,$$

где E_k — модуль упругости каната;

F_k — площадь поперечного сечения проволоки каната;

a — количество ветвей каната, навиваемых на барабан;

U — кратность полиспаста;

L_k — длина каната для данной высоты подъёма h , $L_k = haU$, м;

C_2 — жёсткость тележки механизма главного подъёма, установленной на балках моста;

C_3 — жёсткость главных балок моста, зависящая от положения тележки главного подъёма:

$$C_3 = 48EI \frac{c+b^2}{c^2 b^2},$$

где E — модуль упругости материала балки при растяжении, МПа;

I — момент инерции сечения, м⁴;

c, b — координаты положения тележки;

h_1, h_2, h_3 — соответствующие коэффициенты демпфирования;

$\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3$ — ускорение соответственно масс m_1, m_2, m_3 ;

$\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3$ — скорость соответственно масс m_1, m_2, m_3 ;

x_1, x_2, x_3 — перемещение соответственно масс m_1, m_2, m_3 ;

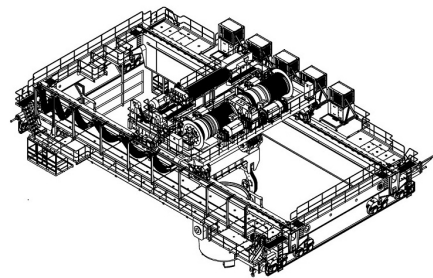
F — действующая сила.

Дополнительно каждая масса обладает частотой собственных колебаний:

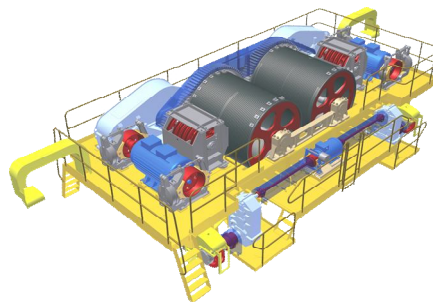
$$f_i = 2\pi \sqrt{\frac{C_i}{m_i}}.$$

Решение уравнения (1) при наличии трёх неизвестных, связанных с перемещением, практически невозможно. Точность расчёта упругодемпфирующих характеристик в конкретном проявлении состояния элементов также имеет большие допущения. Поэтому, одним из вариантов предварительного решения поставленной задачи является проведение экспериментальных исследований для определения упругодемпфирующих характеристик элементов расчетной модели (рис. 2).

Исследования были проведены на модели литейного крана грузоподъемностью 450/90/15 тонн (рис. 3).



а



б

Рисунок 3 Трёхмерные виды крана (а) и тележки главного подъёма (б)

Это четырёхбалочный литейный кран с главной и вспомогательной тележками, которые параллельно перемещаются по своим пролётным балкам моста на разных высотных уровнях (вспомогательная тележка имеет возможность проезда под главной тележкой). Масштаб модели — 1:35.

Основные характеристики модели крана: высота подъёма — 270 мм; скорость подъёма — 1,3 см/с; скорость передвижения — 1,3 см/с; длина хода — 1800 мм. Количество ходовых колёс: крана — 16 шт.; тележки — 8 шт. Способ управления — электрический. Масса крана и его основных частей — 125 кг. Элементы крана показаны на рисунке 4.



а



б

Рисунок 4 Балансирная тележка (а), кабина и траверса главного подъёма (б) модели крана

Измерения параметров вибрации проводились на элементах модели крана при помощи анализатора вибрации 795М с пьезоэлектрическим датчиком С11. Крепление датчика осуществлялось при использовании магнита (рис. 5).

В ходе экспериментов измерялись составляющие спектра виброускорения и временные реализации вибрационного сигнала виброускорения. Параметры настройки прибора при измерениях приведены в таблице 1. Проведено две серии измерений, каждая из которых включала по три цикла.

В первой серии измерения выполнялись на тележке главного подъёма при её горизонтальном перемещении (цикл 1), а также при вертикальном перемещении груза массой 1,3 кг в режиме подъёма с подхватом (цикл 2) и опускании (цикл 3).



а



б

Рисунок 5 Расположение датчика и прибора при проведении измерений

Таблица 1

Параметры настройки прибора

Наименование параметра	Измеряемая характеристика	
	Спектр виброускорения	Временная реализация виброускорения
Единица измерения	м/с ²	м/с ²
Режим интегратора	линейный	линейный
Количество усреднений	4	выключены
Усреднение	частоты	-
Вид усреднения	линейное	-
Усилитель	автонастройка	ручной
Чувствительность датчика, пКл/м/с ²	7,75	7,75
Коэффициент усилителя	6	5
Режим запуска	свободный	свободный
Триггер	внешний	внешний
Тип окна	Хамминга	Хамминга
Диапазон	10...4027	10...4027
Количество точек	1600	16384
Общий уровень	СКЗ=0,7059	-
Период выборки, мкс	-	300
Длина выборки	-	16

На рисунке 6 представлен спектр виброускорения в частотном диапазоне 10...4000 Гц, зафиксированный при горизонтальном перемещении тележки без груза. Максимальное значение виброускорения 0,14 м/с² соответствует частоте 1000 Гц.

Графики временной реализации вибрационного сигнала для данной серии измерений приведены на рисунке 7, а основные характеристики — в таблице 2. Следует отметить стабильный характер сигнала с чётко выраженными амплитудами.

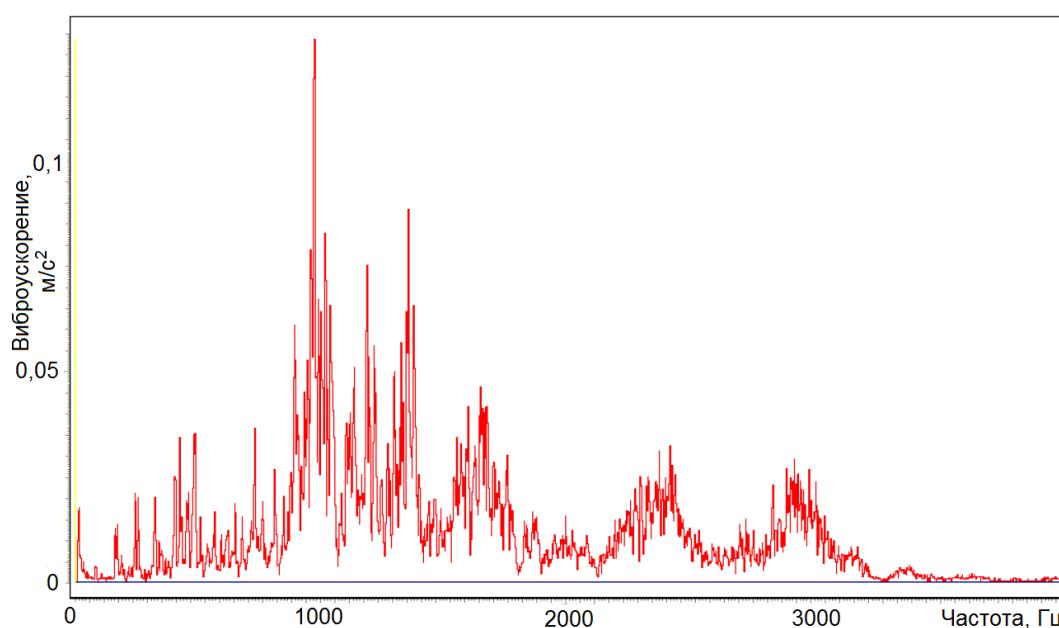


Рисунок 6 Спектр виброускорения при горизонтальном перемещении главной тележки

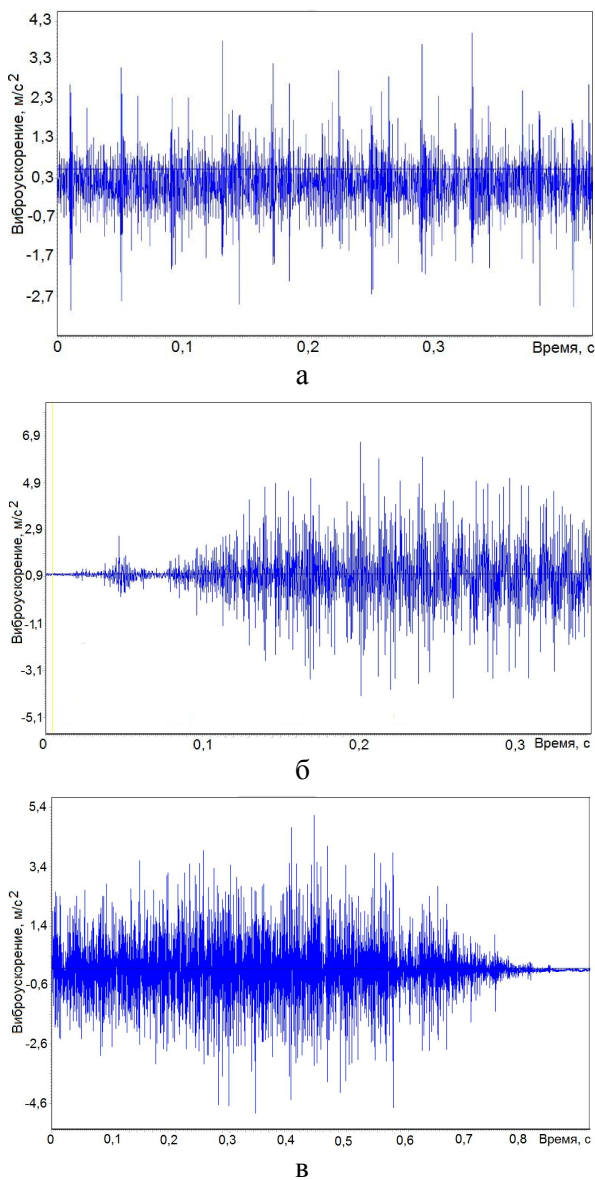


Рисунок 7 Временная реализация виброускорения при горизонтальном перемещении главной тележки (а), подъёме груза с подхватом (б), опускании груза (в)

Таблица 2

Характеристики временной реализации сигнала виброускорения для 1-й серии измерений

№ цикла измерений	Виброускорение, m/s^2		
	min значение	max значение	размах
1	-3,23	+3,53	6,75
2	-7,98	+9,00	16,98
3	-5,0	+5,15	10,15

В ходе второй серии экспериментов моделировалась ситуация резкой разгрузки с использованием груза массой 1,7 кг. При этом измерения виброускорения выполнялись на главной тележке (цикл 4), балке моста (цикл 5) и траверсе (цикл 6). Типичные графики временной реализации вибросигнала, зафиксированные для данной серии измерений, приведены на рисунке 8, а основные числовые характеристики — в таблице 3. Сигналы имеют затухающий характер. Момент разгрузки характеризуется максимальным размахом виброускорения.

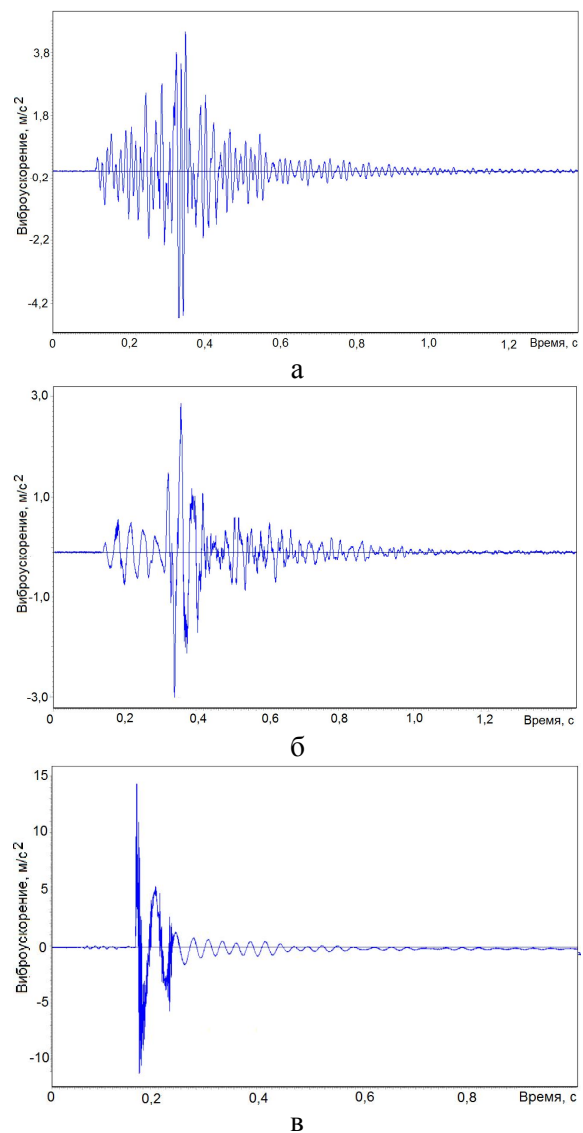


Рисунок 8 Временная реализация виброускорения на тележке (а), балке моста (б), траверсе (в) при резкой разгрузке

Таблица 3

Характеристики временной реализации сигнала виброускорения для 2-й серии измерений

№ цикла измерений	Виброускорение, м/с ²			Длительность воздействия, мс	Продолжительность затухания, мс	Период собственных колебаний, мс	Частота собственных колебаний, Гц
	min значение	max значение	размах				
4	-4,69	+4,41	9,10	944	717	14	71,4
5	-2,95	+2,92	5,87	838	623	25	40,0
6	-4,7	+4,54	9,24	417	422	29	34,5

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили возможность определения частоты собственных колебаний элементов металлоконструкций крана при резкой разгрузке бады с металлоломом.

Возможной практической реализацией метода контроля состояния элементов крана в производственных условиях явля-

ется установка пьезоэлектрических датчиков и измерительной системы в главных балках крана.

Стабильность частот собственных колебаний элементов служит подтверждением неизменности технического состояния металлоконструкций.

Библиографический список

1. РД 10-112-5-97. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 5. Краны мостовые и козловые [Текст] / АО «ВНИИПТМАШ» // Сборник документов. — М. : ОАО «НТЦ „Промышленная безопасность“», 2006. — 404 с.
2. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов [Текст] : ПБ-10-382-00 : [утв. Госгортехнадзор России 31.12.1999]. — СПб. : Изд-во ДЕАН, 2003. — 272 с.
3. Иванов, В. Н. Техническое диагностирование подъёмно-транспортных машин и оборудования [Текст] : монография / В. Н. Иванов. — Х. : Индустрия, 2009. — 204 с.
4. Зарецкий, А. А. Стратегия определения остаточного ресурса грузоподъемных кранов [Текст] / А. А. Зарецкий // Подъемные сооружения. Специальная техника. — 2002. — № 11. — С. 21–23.
5. Концепция оценки остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок [Текст] / В. С. Котельников, А. Ю. Еремин, А. А. Зарецкий, А. А. Короткий // Безопасность труда в промышленности. — 2000. — № 10. — С. 41–46.

© Прудченко Д. О.

© Ошовская Е. В.

© Сидоров В. А.

Рекомендована к печати д.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневым Д. А., д.т.н., доц., зав. каф. УК ДонНТУ Ченцовым Н. А.

Статья поступила в редакцию 15.04.2022.

Prudchenko D. O., PhD in Engineering Oshovskaia E. V., Doctor of Technical Sciences

Sidorov V. A. (DonNTU, Donetsk, DPR, evo2008@bk.ru)

OSCILLATIONS OF METAL CHARGING CRANES OF ELECTRIC STEELMAKING

There have been given the possibilities of assessing the state of metal foundries, in particular charging cranes, electric steelmaking based on the analysis of the main beams oscillations that occur during the bailer unloading. The experiments were performed on a laboratory model.

Key words: metalworks, charging crane, oscillations, condition.

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

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

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

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

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

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

Обязательные элементы статьи:

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

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

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

Результаты работы не должны предоставляться в виде тезисов.

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

Статья должна сопровождаться:

- внутренней и внешней рецензиями;

– лицензионным договором с автором(и).

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

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

Языки предоставления статей: русский, английский.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

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

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

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

Оформление статей

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Оформление аннотаций отдельным файлом

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

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

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

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

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

Оформление рефератов отдельным файлом

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

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — учёная степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

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

Через интервал повторить данные для каждого автора.

Через интервал — название статьи (полужирным начертанием).

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

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

Рисунки

Рисунки вставляются в текст единым объектом и могут быть представлены:

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

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

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

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

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

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

Формулы

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

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

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

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

Двоеточие перед формулой не ставится, независимо от правил пунктуации.

Таблицы

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

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

СОДЕРЖАНИЕ**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

<i>Литвинский Г. Г.</i> ФРАГМЕНТАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ТЕЛЕ С МИКРОДЕФЕКТАМИ	5
<i>Ноженко А. А.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВЗРЫВОВ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ШАХТАХ И ИХ ЛОКАЛИЗАЦИИ	18

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Кравцова С. И., Ивлева Н. И.</i> УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МЕТОД И КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТОЧНЕННЫХ КОНСТАНТ ФОРМУЛ РАСЧЕТА ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ГРУПП МАРОК СТАЛЕЙ	27
<i>Русанов И. Ф., Русанова Н. И., Лебедев В. А.</i> КОЛЕБАНИЯ СИТОВОГО СОСТАВА АГЛОМЕРАТА НА ВЫХОДЕ ИЗ БУНКЕРОВ И ИХ КОМПЕНСАЦИЯ В ДОМЕННОМ ПРОЦЕССЕ	38
<i>Куберский С. В., Проценко М. Ю., Воронько М. И.</i> АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА МЕТОДА ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ	45

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Будзило Е. Е., Збицкая В. В.</i> К ВОПРОСУ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДОЗАЩИТЫ ОТКРЫТЫХ СТЫКОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ, СКЛАДСКИХ ПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ	55
<i>Николаева Е. К., Лахтин К. И., Глушкина И. К.</i> ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АДМИНИСТРАТИВНО-ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ В СОСТАВЕ ВОЕННЫХ БАЗ В АРКТИКЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	61

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Харламов Ю. А., Петров П. А., Козачишен В. А., Изюмов Ю. В.</i> ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ. СООБЩЕНИЕ 3. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ОБРАБАТЫВАЮЩИХ И ОБСЛУЖИВАЮЩИХ ОТРАСЛЯХ ЭКОНОМИКИ	73
<i>Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Коваленко О. А., Захаров О. В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОРЯДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ	85
<i>Вишневский Д. А., Бондарь Н. А., Гайдар А. И.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ, УТОМЛЯЕМОСТИ И ОШИБАЕМОСТИ ОПЕРАТОРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ С УЧЕТОМ УПРАВЛЯЕМЫХ И НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ФАКТОРОВ	91
<i>Прудченко Д. О., Ошовская Е. В., Сидоров В. А.</i> КОЛЕБАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЗАВАЛОЧНЫХ КРАНОВ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	97

CONTENT**GEOSCIENCES**

<i>Litvinsky G. G.</i> FRAGMENTATION OF STRESSES IN THE BODY WITH MICRODEFECTS	5
<i>Nozhenko A. A.</i> IMPROVING THE MEANS OF PREVENTING COAL DUST EXPLOSIONS IN MINES AND THEIR LOCALIZATION	18

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES

<i>Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., Kravtsova S. I., Ivleva N. I.</i> IMPROVED METHOD AND SOFTWARE PROGRAM FOR DETERMINING THE REFINED CONSTANTS OF FORMULAS FOR CALCULATING THERMOKINETIC PARAMETERS FOR GROUPS OF STEEL GRADES	27
<i>Rusanov I. F., Rusanova N. I., Lebedev V. A.</i> FLUCTUATIONS IN THE SIEVE COMPOSITION OF SINTER ON EXIT FROM THE BUNKERS AND THEIR COMPENSATION IN THE BLAST FURNACE PROCESS	38
<i>Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I.</i> ANALYZING THE ENERGY BALANCE OF THE ARC DEPTH SILICON REDUCTION METHOD	45

CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

<i>Budzilo E. E., Zbitskaia V. V.</i> ON THE ISSUE OF IMPROVING THE WATER PROTECTION INDICATORS OF OPEN JOINTS OF INDUSTRIAL, AGRICULTURAL, WAREHOUSE PANEL BUILDINGS	55
<i>Nikolaeva E. K., Lakhtin K. I., Glushkina I. K.</i> PRINCIPLES OF DESIGNING ADMINISTRATIVE AND RESIDENTIAL COMPLEXES AS PART OF MILITARY BASES IN THE ARCTIC OF THE RUSSIAN FEDERATION	61

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Kharlamov Yu. A., Petrov P. A., Kozachishen V. A., Izyumov Yu. V.</i> DETONATION-GAS TECHNOLOGIES AND DEVICES: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT. REPORT 3. APPLICATION OF GAS DETONATION IN PROCESSING AND MAINTAINING ECONOMIC BRANCHES	73
<i>Korneev S. V., Dobronogova V. Yu., Kovalenko O. A., Zakharov O. V.</i> STUDYING THE STRESS-STRAIN STATE OF MULTI-ROW MECHANICAL JOINTS OF CONVEYOR BELTS	85
<i>Vishnevskiy D. A., Bondar N. A., Gaidar A. I.</i> MATHEMATICAL MODELING OF INTERRELATION BETWEEN THE OPERABILITY, FATIGUE AND ERROR RATE OF THE METALLURGICAL INDUSTRY OPERATOR, CONSIDERING THE CONTROLLED AND UNCONTROLLED FACTORS	91
<i>Prudchenko D. O., Oshovskaia E. V., Sidorov V. A.</i> OSCILLATIONS OF METAL CHARGING CRANES OF ELECTRIC STEELMAKING	97

Distribution and replication is forbidden without official allowance of SEI HE "DonSTI"

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

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

Collection
Issue 27 (70) 2022

Establisher:
SEI HE "DonSTI" (LPR)

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

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

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

*Recommended by academic council
of SEI HE "DonSTI"
(Record № 10 dated 29.06.2022)*

Added to scientometrical database of RSCI

Format 60×84½
Conventional printed sheet 13,75
Order № 153

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

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

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

Editor-in-chief

Vishnevskiy D. A. — Doctor of Tech. Sc., Asst. Prof.,
Rector

Deputy Editor-in-chief

Smekalin E. S. — PhD in Engineering, Asst. Prof.,
Vice-Rector for Science

Editorial board:

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

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

Issue language:
Russian, English

Computer layout
Ismailova L. M.

© SEI HE "DonSTI", 2022
© Chernyshova N. V., graphic cover
design, 2022