

**ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

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

ВЫПУСК 2 (76)

АПЧЕВСК, 2023

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

Научный журнал
Выходит 4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 2 (76) 2023

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

Scientific journal
Publishing 4 times a year
Founded in June 1999
Issue 2 (76) 2023

Алчевск
2023

УДК 622(06) + 669(06) + 621 + 658.58 + 712-1

**Наукоёмкие технологии и оборудование
в промышленности и строительстве**

Научный журнал

Выпуск 2 (76) 2023

**Основатель:
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»**

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

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

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

*Рекомендовано учёным советом
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»
(Протокол № 6 от 27.12.2023)*

Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84½
Усл. печат. л. 14,38
Заказ № 1
Тираж 100 экз.

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

Адрес редакции, издателя и основателя:
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, ЛНР
294204
E-mail: info@dstu.education
Web-site: http://www.dstu.education

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

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.

Борщевский С. В. — д.т.н., проф.

Корнеев С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. А. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Артюх В. Г. — д.т.н., проф.

Витренко В. А. — д.т.н., проф.

Зинченко А. М. — к.э.н., доц.

Снитко С. А. — д.т.н., доц.

Корзун Е. Л. — д.т.н., проф.

Яковченко А. В. — д.т.н., проф.

Куберский С. В. — к.т.н., проф.

Денищенко П. Н. — к.т.н., проф.

Давиденко А. И. — д.т.н., проф.

Сулейманова Л. А. — д.т.н., проф.

Смоляго Г. А. — д.т.н., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной
коллегии

Для научных сотрудников, аспирантов,
студентов высших учебных заведений.

Язык издания:
русский, английский

Компьютерная вёрстка
Исмаилова Л. М.

© ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2023

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

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

SUBSURFACE MANAGEMENT

УДК 622.232.32

Корнеев С. В., *Доброногова В. Ю., Долгих В. П.
 Донбасский государственный технический университет
 *E-mail: kafedra.gemio@dstu.education

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

Предложен упрощенный метод расчета геометрических параметров зубчатых соединений резинотканевых конвейерных лент, в основу которого положены: 1) принцип равнопрочности, согласно которому в момент разрушения связи между соединяемыми поверхностями достигаются одновременно ее предел прочности на отрыв и предел прочности при сдвиге, причем обеспечивается максимальное значение прочности стыка; 2) равенство расчетной прочности стыка агрегатной прочности ленты.

Ключевые слова: конвейерная резинотканевая лента, зубчатый стык, метод расчета, прочность стыка, прочность связи на отрыв, прочность связи на сдвиг, условие равнопрочности, геометрические параметры, угол при вершине зуба, угол при вершине грани зуба, высота зуба.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. При соединении многопрокладочных резинотканевых конвейерных лент способом горячей или холодной вулканизации, как показывает практика эксплуатации конвейеров, стыки в подавляющем большинстве случаев имеют ступенчатую конструкцию полунахлестного или нахлестного типов. Только в горной промышленности ежегодно эксплуатируется около 40 тыс. таких стыков.

Статическая прочность вулканизованных стыков ступенчатой конструкции не превышает 70...75 % агрегатной прочности целой ленты, что является их существенным недостатком. Также следует обратить внимание на их относительно невысокую долговечность, составляющую 30...70 %, большую трудоемкость изготовления одного стыка, достигающую, в зависимости от прочности и ширины ленты, 40...96 чел. ч. Очевидно, стыки, с точки зрения надежности тягового органа конвейера, являются его «слабейшим звеном». Достаточно отметить, что около 80 % времени вынужденных простоев конвейеров и 25 % простоев основного горного оборудования связано с разрушением соединений конвейерных лент [1].

Основными направлениями повышения эксплуатационной надежности вулканизи-

рованных стыков следует считать совершенствование их конструкции, технологии соединения и качества применяемых материалов, а также обоснованный выбор параметров соединений с учетом особенностей их конструкции и условий эксплуатации.

Известны бесступенчатые клиновые и профильные вулканизованные соединения [2–5].

Клиновые соединения привлекают своей технологичностью, а также возможностью их применения при дефектах каркаса в виде продольных и поперечных гофр. Установлено, что распределение касательных и отрывающих напряжений в соединительной прослойке клиновых соединений близко к равномерному, а несущая способность — в 1,05...1,1 раза выше, чем у трех-, четырехступенчатых, и в 1,2...1,4 раза больше, чем у одноступенчатых стыков [2].

Достоинством профильных соединений является простота изготовления при значительной площади соединяемых поверхностей, недостатком — повышенные требования к точности их изготовления.

Из профильных наиболее перспективными являются зубчатые соединения, в которых разделяемые по ширине ленты концы представляют собой треугольные

выступы и впадины с нормальными по отношению к поверхности ленты боковыми гранями. Соединяют концы ленты встык, укладывая выступы одного конца ленты во впадины другого. Для стыковки цельнотканых лент на основе поливинилхлорида, например, на соединяемых концах с помощью шаблона вырезают равнобедренные треугольники с основанием 40...70 мм и длиной свыше 400 мм. Такой стык называется «пальцевым».

В работе [6] предложен новый тип зубчатого соединения, в котором боковые поверхности зубьев имеют форму клина, т. е. боковые грани выступов наклонены под некоторым углом к поверхности ленты. Варианты стыков подобного типа, обладающих также достоинствами клиновых соединений, отражены в целом ряде работ и патентов, в том числе в [7, 8].

В таких стыках объединены достоинства «пальцевых» и клиновых соединений.

Соединительные прослойки (адгезив) зубчатых стыков такого типа, находящиеся в объемном напряженном состоянии, удерживают соединяемые поверхности, препятствуя отрыву одной поверхности от другой, а также, как в случае ступенчатого стыка, относительно смещению этих поверхностей в плоскости стыка (сдвига), т. е. работают одновременно на сдвиг и на отрыв. При этом касательные напряжения в плоскости прослойки и нормальные напряжения, перпендикулярные плоскости прослойки («отдирающие» напряжения), могут оказываться величинами одного порядка.

Постановка задачи. Параметрами, определяющими прочность любого типа ступенчатых соединений резинотканевых конвейерных лент, являются физико-механические характеристики элементов стыка, площадь стыкуемых поверхностей или определяющие ее геометрические параметры, такие как: ширина ленты, длина и угол скоса стыка, число ступеней. Методы расчета параметров ступенчатых стыков апробированы и представлены в многочисленных работах, например в [2, 5].

Особенностью расчетов является предположение о том, что концы лент соединены независимыми связями сдвига и поперечными связями. В связях сдвига возникают касательные напряжения τ , а в поперечных — отрывающие (нормальные) напряжения σ . При оценке прочности соединения найденные касательные и отрывающие напряжения сравниваются с их допустимыми значениями. Равнопрочность элементов стыка обеспечивается при равенстве коэффициентов запасов прочности соединительного слоя и каркаса.

Методы расчета параметров зубчатых стыков в настоящее время не известны.

В связи с этим *целью* настоящей работы является разработка упрощенного метода расчета геометрических параметров зубчатого стыка резинотканевой конвейерной ленты, обеспечивающих в момент разрушения связи между соединяемыми поверхностями: 1) одновременное достижение в адгезиве предела прочности на отрыв и предела прочности при сдвиге, причем обеспечивается максимальное значение прочности стыка; 2) равенство расчетной прочности стыка агрегатной прочности ленты.

Объект исследования — процесс нагружения зубчатого вулканизированного стыка резинотканевых конвейерных лент.

Предмет исследования — параметры зубчатого вулканизированного стыка резинотканевых конвейерных лент, обеспечивающие условие его равнопрочности.

Задачи исследования:

– определение нагрузок в элементах зубчатого стыка резинотканевых конвейерных лент;

– выбор критериев расчета и определение расчетных зависимостей параметров зубчатого стыка резинотканевых конвейерных лент.

Методика исследования. Конфигурация зубьев соединения определяется углом при вершине зуба, углами наклона боковых граней и оформлением торца. Рассматривается вариант исполнения зуба, предлагае-

мый в работе [5], согласно которому образующие зубья боковые грани наклонены под углом α к одной из поверхностей ленты, пересекаясь у вершины и у основания зуба. Итак, на поверхностях ленты образуются равнобедренные треугольники с высотой L (далее L — высота зуба), боковые поверхности зуба представляют собой параллелограмм, а сечение зуба плоскостью, нормальной к высоте L , — равнобедренную трапецию. Схема зубчатого соединения представлена на рисунке 1.

Расчет стыка проводится согласно первой теории прочности.

При этом принимаются следующие допущения:

1. В стыке целое число i зубьев.
2. Усилие натяжения ленты S равномерно распределено по ширине ленты и по площади стыкуемых поверхностей тягового каркаса ленты.
3. Грани каждого зуба стыка, вследствие его симметрии, нагружаются одинаково силой S_T , $S_T = S/2i$.

4. Вслед за А. А. Реутовым [2] полагаем, что стык имитируется продольными связями, препятствующими сдвигу соединяемых поверхностей, и поперечными связями, препятствующими отрыву этих поверхностей. В продольных связях возникают тангенциальные напряжения, направленные параллельно соединяемым поверхностям, а в поперечных связях — отрывающие напряжения, нормальные к соединяемым поверхностям. Средняя прочность на отрыв $[\sigma]$ не зависит от тангенциальных нагрузок τ в прослойке, а средняя прочность на сдвиг $[\tau_{пр}]$ не зависит от нормальных напряжений σ в прослойке.

5. Угол скоса стыка равен 90° .

Исходные параметры: B — ширина ленты; h — толщина тягового каркаса ленты; способ вулканизации стыка; требуемая прочность стыка $S_{пр}$ в продольном направлении; средняя прочность $[\tau_{пр}]$ при сдвиге и средняя прочность $[\sigma]$ на отрыв, в качестве которых принимаются соответствующие механизму разрушения стыка адгезионная и когезионная прочности прослойки.

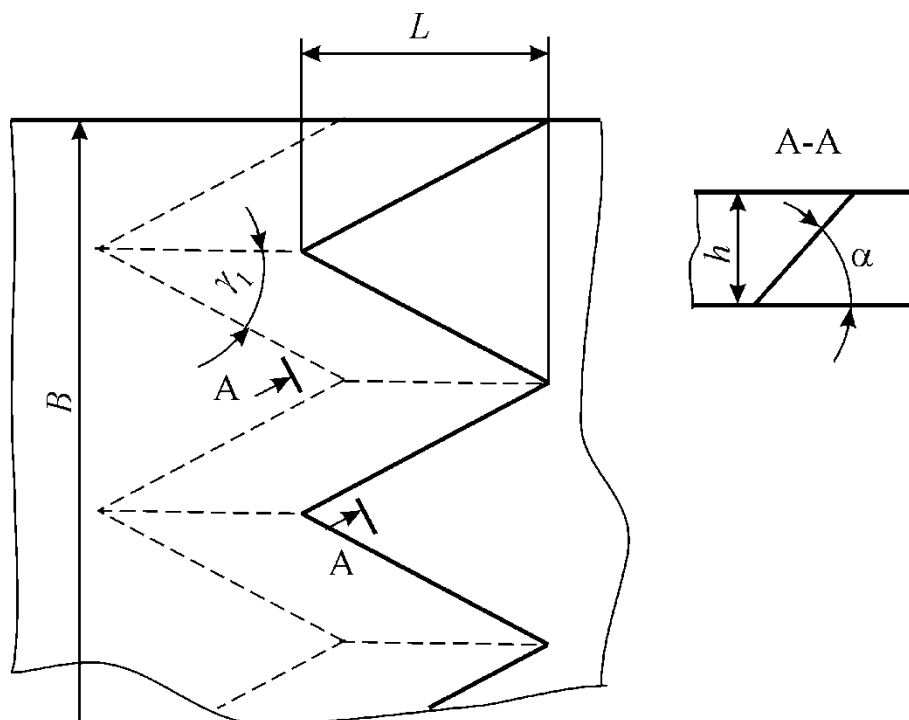


Рисунок 1 — Схема зубчатого соединения

Рассчитываемые параметры: L — высота зуба; α — угол, образуемый между нормалью к ребру зуба, лежащей на поверхности грани зуба, и проекцией этой нормали на поверхность ленты; γ — угол при вершине зуба на поверхности ленты.

Изложение материала. Как видно из рисунка 1:

– число зубьев в стыке:

$$i = \frac{B}{2L \operatorname{tg} \gamma_1}, \quad (1)$$

где γ_1 — угол заострения зуба, равный половине угла γ , $\gamma_1 = \gamma/2$;

– площадь поперечного сечения сердечника ленты, отнесенная к половине зуба:

$$F_0 = \frac{hB}{2i}; \quad (2)$$

– площадь поверхности одной грани:

$$F_\Gamma = \frac{hL}{\cos \gamma_1 \sin \alpha}; \quad (3)$$

– площадь поверхности соединения:

$$F = 2iF_\Gamma = \frac{hB}{\sin \gamma_1 \sin \alpha}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что при рассматриваемой форме зуба (грани) суммарная площадь соединяемой поверхности инвариантна к числу зубьев и длине зуба, которые находятся между собой в обратно-пропорциональной зависимости. Иначе, увеличение числа зубьев в n раз приводит к уменьшению во столько же раз длины зуба и вообще его линейных размеров. Выбор этих параметров при заданном угле заострения γ_1 не влияет на площадь соединяемой поверхности, и если не принимать во внимание возможность концентрации напряжений в определенных местах стыка, — то и на его прочность. Таким образом, параметры i и L должны определяться из технологических или экономических соображений.

Для определения углов γ_1 и α рассмотрим силы, действующие на стык.

При значениях углов $\pi/2 > \gamma_1 > 0$ и $\alpha = \pi/2$ боковая грань представляет собой прямоугольник, продольное усилие натяжения ленты S_Γ (в векторной форме), действующее на грань зуба, равно геометрической сумме нормальной к стыкуемой поверхности грани силы S_n и тангенциальной силы S_τ , лежащей в плоскости стыка и направленной параллельно поверхности ленты, $S_\Gamma = S_{\Gamma,n} + S_{\Gamma,\tau}$.

При этом в скалярной форме

$$S_\Gamma = \sqrt{S_{\Gamma,n}^2 + S_{\Gamma,\tau}^2}; \quad S_{\Gamma,n} = S_\Gamma \sin \gamma_1; \\ S_{\Gamma,\tau} = S_\Gamma \cdot \cos \gamma_1.$$

При $\alpha < \pi/2$, что равносильно повороту плоскостей, образующих грани зубца, вокруг ребра (грани представляют собой параллелограмм) на угол $\pi/2 - \alpha$, силы, действующие на грань, определяются по формулам:

$$S_{\Gamma,n} = S_\Gamma \sin \gamma_1 \sin \alpha; \\ S_{\Gamma,\tau} = S_\Gamma \sqrt{\cos^2 \gamma_1 + \sin^2 \gamma_1 \cos^2 \alpha}.$$

Разделив $S_{\Gamma,n}$ и $S_{\Gamma,\tau}$ на площадь грани, получим, соответственно, нормальное и тангенциальное напряжение:

$$\sigma = \frac{S_\Gamma \sin \gamma_1 \sin \alpha}{F_\Gamma}; \quad (5)$$

$$\tau = \frac{S_\Gamma \sqrt{\cos^2 \gamma_1 + \sin^2 \gamma_1 \cos^2 \alpha}}{F_\Gamma}. \quad (6)$$

С учетом выражений (1) и (3) формулы (5) и (6) обретают вид:

$$\sigma = \frac{S \sin^2 \gamma_1 \sin^2 \alpha}{hB}; \quad (7)$$

$$\tau = \frac{S \sin \gamma_1 \sin \alpha \sqrt{\cos^2 \gamma_1 + \sin^2 \gamma_1 \cos^2 \alpha}}{hB}. \quad (8)$$

Критериями выбора углов γ_1 и α являются условия: 1) обеспечение в момент разрушения стыка равенства нормальных σ и тангенциальных τ напряжений на поверхности грани зуба соответствующим

пределам прочности связи соединяемых поверхностей каркаса ленты при их работе на отрыв $[\sigma]$ и на сдвиг $[\tau_{\text{пр}}]$ (условие равнопрочности связи в обоих направлениях) и, таким образом, достижения максималь-

ной прочности стыка $S_{\text{ст}}$; 2) равенства расчетной прочности стыка $S_{\text{ст}}$ агрегатной прочности ленты $S_{\text{л}}$.

С учетом принятых критериев выражения (7) и (8) представляются в виде:

$$[\sigma] = \frac{S_{\text{л}} \sin^2 \gamma_1 \sin^2 \alpha}{hB}; \quad (9)$$

$$[\tau_{\text{пр}}] = \frac{S_{\text{л}} \sin \gamma_1 \sin \alpha}{hB} \times \frac{\sqrt{\cos^2 \gamma_1 + \sin^2 \gamma_1 \cos^2 \alpha}}{hB}. \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) после несложных преобразований получим инвариантное к параметрам ленты соотношение углов γ_1 и α , необходимое для одновременного достижения $[\sigma]$ и $[\tau_{\text{пр}}]$ при нагружении стыка:

$$\gamma_1 = \arctg \sqrt{\frac{1}{k^2 \sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha}}, \quad (11)$$

где k — отношение $[\sigma]$ к $[\tau_{\text{пр}}]$, т. е. $k = [\sigma] / [\tau_{\text{пр}}]$.

Значение угла α можно установить, подставив полученное выражение (11) в формулу (9) или (10) и разрешив ее относительно α .

Если подставить выражение (11) в формулу (9), то получим уравнение:

$$[\sigma] - \frac{S_{\text{л}}}{hB} \times \frac{\sin^2(\arctg \sqrt{1 / (k^2 \sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha)})}{hB} \times \frac{\sin^2 \alpha}{hB} = 0. \quad (12)$$

Приведенные уравнения могут быть применены для расчета клинового соединения (клин рассматривается как грань зуба), а также, если положить $\alpha = 90^\circ$, то и для расчета «пальцевых» соединений.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. При заданном угле заострения зубьев число зубьев и их длина находятся между собой в обратно пропорциональной зависимости, не влияют на площадь соединяемой поверхности и его прочность, поэтому должны определяться из технологических или экономических соображений.

2. Площадь поверхности стыка определяется толщиной и шириной каркаса лен-

ты, а также углами, определяющими конфигурацию зуба, которые рассчитываются исходя из условий: 1) обеспечения в момент разрушения стыка равенства нормальных и тангенциальных напряжений в связующем слое стыка соответствующим значениям прочности связи и, таким образом, условию достижения максимальной прочности стыка; 2) равенства прочности стыка агрегатной прочности ленты.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение пределов прочности элементов конструкции и рациональных параметров «зубчатых» соединений конкретных резиноканевых конвейерных лент.

Список источников

1. Кузьменко В. И. Состояние вопроса и проблемы эксплуатации конвейерных лент // Перспективы развития угольной промышленности в XXI веке : сб. науч. тр., посвящ. 45-летию ДГМИ. 2002. С. 141–150.
2. Реутов А. А. Конструкции и расчет соединений резиноканевых конвейерных лент. 1997. 64 с.
3. Рубин М. А. Напряжения в клеевой прослойке клиновидного стыка резиноканевых конвейерных лент // Машиностроение. 1983. № 5. С. 93–96.

4. Прушак В. Я., Миранович О. Л. Оценка эффективности соединений конвейерных лент // Вестник БНТУ. 2006. № 4. С. 18–22.

5. Кузьменко В. И., Доброногова В. Ю. Определение напряжений в элементах соединений конвейерных лент с тканевым каркасом // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2005. Вып 20. С. 92–98.

6. Способ соединения конвейерных лент : а. с. 1548075 СССР / В. И. Кузьменко, Е. Х. Завгородний, А. В. Переселков, Т. Н. Бородина ; № 4451867/31-05 ; заявл. 30.06.88 ; опубл. 07.03.90, Бюл. № 9.

7. Спосіб з'єднання конвеєрних стрічок : пат. 41552А Україна / В. І. Кузьменко, В. Ю. Доброногова ; № 2000020684 ; заявл. 08.02.2000 ; опубл. 17.09.2001, Бюл. № 8.

8. Спосіб з'єднання конвеєрних стрічок : пат. 51459А Україна / В. І. Кузьменко, В. Ю. Доброногова ; № 2002042729 ; заявл. 05.04.2002 ; опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11.

© Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ГБП ДонГТУ Леоновым А. А., к.т.н., доц., зав. каф. общинженерных дисциплин СИПИМ ЛГУ им. В. Даля Сафоновым В. И.

Статья поступила в редакцию 07.12.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Корнеев Сергей Васильевич, д-р техн. наук, профессор каф. горных энергомеханических систем Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Доброногова Виктория Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. горных энергомеханических систем Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия, e-mail: kafedra.gemio@dstu.education

Долгих Виталий Павлович, канд. техн. наук, доцент каф. горных энергомеханических систем Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Korneev S. V., *Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: kafedra.gemio@dstu.education)

THE SHORT-CUT COMPUTATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS FOR THE TEETH JOINTS OF FABRIC-PLY BELTS

There has been proposed the short-cut computation of geometrical parameters for the teeth joints of fabric-ply belts based on: 1) the principle of strength uniformity, according to which, at the moment when the link breaks between the jointed surfaces, its tear-off bond strength and shear bond strength are achieved simultaneously, and the maximum boundary strength is ensured; 2) the equivalence of computed joint strength of the aggregate belt strength.

Key words: fabric-ply belt, tooth joint, method of computation, boundary strength, tear-off bond strength, shear bond strength, equal-strength condition, geometrical parameters, angle of tooth point, apex angle of tooth flank, tooth height.

References

1. Kuz'menko V. I. State of the art and problems of conveyor belts operation [Sostoyanie voprosa i problemy ekspluatsii konvejernyh lent]. Perspektivy razvitiya ugol'noj promyshlennosti v XXI veke : sb. nauch. tr., posvyashch. 45-letiyu DGMI. 2002. Pp. 141–150. (rus)

2. Reutov A. A. *Designs and calculation of joints of fabric-ply belts [Konstrukcii i raschet soedinenij rezinotkanevyh konvejernyh lent]*. 1997. 64 p. (rus)

3. Rubin M. A. *Stresses in the adhesive interlayer of the wedge-shaped joint of fabric-ply belts [Napryazheniya v kleevoj proslojke klinovidnogo styka rezinotkanevyh konvejernyh lent]*. *Mechanical engineering*. 1983. No. 5. Pp. 93–96. (rus)

4. Prushak V. Ya., Miranovich O. L. *Evaluation of belt connection efficiency [Ocenka effektivnosti soedinenij konvejernyh lent]*. *Vestnik BNTU*. 2006. No. 4. Pp. 18–22. (rus)

5. Kuz'menko V. I., Dobronogova V. Yu. *Determination of stresses in elements of joints of conveyor belts with fabric frame [Opredelenie napryazhenij v elementah soedinenij konvejernyh lent s tkanevym karkasom]*. *Sbornik nauchnyh trudov DonGTU*. 2005. Iss. 20. Pp. 92–98. (rus)

6. Kuz'menko V. I., Zavgorodnij E. H., Pereselkov A. V., Borodina T. N. *Method of connecting conveyor belts : a. s. 1548075 USSR ; No. 4451867/31-05 ; submitted 30.06.88 ; published 07.03.90, bulletin No. 9.*

7. Kuz'menko V. I., Dobronogova V. Yu. *Method of connecting conveyor belts : Patent 41552A Ukraine ; No. 2000020684 ; submitted 08.02.2000 ; published 17.09.2001, bulletin No. 8.*

8. Kuz'menko V. I., Dobronogova V. Yu. *Method of connecting conveyor belts : Patent 51459A Ukraine ; No. 2002042729 ; submitted 05.04.2002 ; published 05.04.2002, bulletin No. 11.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korneev Sergey Vasiliyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mining Power Engineering Systems
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Dobronogova Viktoriya Yuriyevna, PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Mining Power Engineering Systems
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia
e-mail: kafedra.gemio@dstu.education

Dolgikh Vitaliy Pavlovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Mining Power Engineering Systems
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

УДК 622.834

**Доценко О. Г., Кизияров О. Л., Аверин Г. А.
Донбасский государственный технический университет
E-mail: dotcenkoo@mail.ru

УСТАНОВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ОБРУШЕННЫХ ПОРОД ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА НА ПОЧВУ ПЛАСТА ВО ВРЕМЕНИ

В статье приведены результаты аппроксимации экспериментальных данных по изменению давления на почву отработанного пласта во времени модифицированной логистической функцией Перла — Рида. Получены зависимости, описывающие процесс нарастания горного давления в выработанном пространстве для глубин разработки, характерных для Донбасса (до 1100 м).

Ключевые слова: *давление на почву извлеченного пласта, обрушенные породы, выработанное пространство, стабилизация горного давления, глубина разработки, S-образная кривая, экстраполяция.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Ухудшение условий добычи угля на больших глубинах из-за интенсивного проявления горного давления способствует увеличению числа выработок, имеющих неудовлетворительные эксплуатационные условия. Решить проблему устойчивости можно путем поддержания подготовительных горных выработок, проводя их вслед за очистным забоем [1] в обрушенных и уплотненных породах выработанного пространства. В процессе выемки угля за лавой происходит обрушение пород непосредственной кровли, а затем и основной. В процессе уплотнения обрушенных пород происходит рост их давления на почву извлеченного угольного пласта, изменяется напряженно-деформированное состояние пород, что необходимо учитывать при установлении параметров размещения и крепления выработок, проводимых в выработанном пространстве.

Таким образом, **целью** настоящей работы является установление закономерностей изменения давления обрушенных пород в выработанном пространстве лавы во времени.

Объект исследования — процесс уплотнения обрушенных пород выработанного пространства.

Предмет исследования — закономерности изменения давления уплотняющихся

во времени пород на почву извлеченного пласта.

Задачи исследования:

– на основе экспериментальных данных проанализировать характер изменения давления на почву пласта уплотняющихся пород;

– обосновать наиболее предпочтительную аппроксимирующую функцию, описывающую связь давления обрушенных пород на почву пласта с продолжительностью уплотнения; оценить ее адекватность;

– экстраполировать полученную зависимость для широкого диапазона значений глубин разработки.

Методика исследования. В работе использован комплексный метод исследования, включающий анализ результатов инструментальных наблюдений за изменением давления на почву отработанного пласта, аппроксимацию результатов экспериментальной работы с применением методов математической статистики.

Изложение материала. В выработанном пространстве лавы давление на почву отработанного пласта создают породы, отслоившиеся от массива кровли и находящиеся внутри области подработки.

Механические процессы, происходящие в подработанных массивах, зависят от времени, так как обрушенные породы по мере отхода лавы постепенно уплотняются. Про-

цесс уплотнения характеризуется скоростью и длительностью. В работе [2] представлены результаты установления времени стабилизации горного давления на почву извлеченного пласта, полученные посредством анализа процесса оседания подработанной горными работами земной поверхности:

$$t_{акт} = \sqrt{H \cdot f} \cdot (m \cdot L \cdot v)^{0,12}, \text{ сут.}, \quad (1)$$

где H — глубина разработки, м;
 f — средняя крепость пород, формирующих свод обрушения;

m — вынимаемая мощность пласта, м;

L — длина лавы, м;

v — скорость подвигания лавы, м/мес.

Для зависимости (1) установлены граничные условия: $240 < H < 1100$ м; $4,95 < f < 6,5$; $1 < m < 2,3$ м; $24 < v < 83$ м/мес.; $78 < L < 310$ м.

В большинстве случаев давление определяют путем заложения динамометров в выработанном пространстве вслед за очистным забоем [1, 3] с последующим измерением нагрузки на них во времени по мере отхода лавы. В работе [3] приведены результаты изменения давления в выработанном пространстве лав в условиях Челябинского угольного бассейна ($H=240$ м). Показания динамометров представлены на рисунке 1 в виде точек в системе координат $t-P$, где t — время проведения замера после прохода лавы, сут.; P — давление, фиксируемое прибором, МПа.

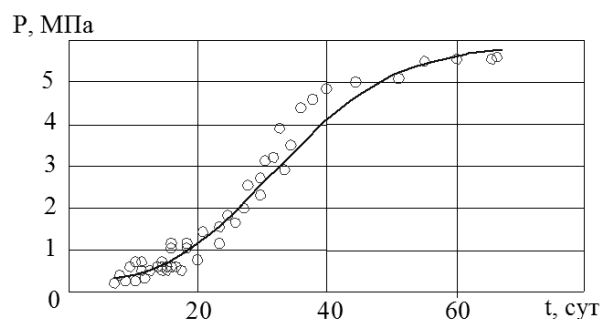


Рисунок 1 — Фактические данные замеров изменения давления в выработанном пространстве лавы и аппроксимирующая их логистическая кривая

Продолжительность стабилизации давления пород на уровне γH совпадает со временем оседания массива $t_{акт}$, рассчитанного по формуле (1) и составляет 73 суток после прохода лавы. В течение указанного периода давление изменяется в 3 этапа: умеренного роста, интенсивного роста и стабилизации.

Автор в работе [3] для определения величины давления в каждый момент времени предлагает использовать кусочную аппроксимацию, где для каждого из этапов изменения давления предлагается отдельная зависимость. Данный подход неудобен с практической точки зрения ввиду отсутствия четкой информации о том, на каком расстоянии от лавы начинается тот или иной этап изменения давления и каков вес пород, не принимающих участия в том или ином периоде. Экспериментальные данные [3] необходимо аппроксимировать одной зависимостью.

При построении модели важна достаточная точность и простота описания основной кривой процесса нарастания горного давления в выработанном пространстве на всем промежутке его стабилизации. До посадки основной кровли (шаг посадки $l_n=10$ м) давление имеет нулевое значение; с момента обрушения пород (на 7-е сутки после прохода лавы) берет начало этап умеренного роста. Обрушаясь с разрывом сплошности, породы образуют свод. При формировании свода обрушенных пород давление в выработанном пространстве интенсивно нарастает и далее, по мере восприятия сводом веса вышележащих пород, стабилизируется.

В процессе аппроксимации были рассмотрены экспоненциальная функция вида

$$P(t) = \frac{t}{e^{a-bt} - 1}, \text{ гиперболическая } P(t) = \frac{t}{a-b \cdot t}$$

и логистическая зависимости. Наилучшим образом данные корреляционного поля (рис. 1) могут быть описаны S-образной кривой, называемой логистой. Её применение в «закрытой системе» оправдано,

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

так как имеет место предельная величина (γH), сверх которой рост давления в выработанном пространстве невозможен.

Рассмотрим логистическую зависимость Перла — Рида [4], которая отражает медленное увеличение от асимптотического минимума, переходящее в быстрое многократное увеличение на стадии интенсивного роста, по окончании которого начинается этап стабилизации, заключающийся в замедлении роста давления и в достижении асимптотического максимума:

$$P(t) = \frac{A}{1 + a \cdot e^{-bt}}, \quad (2)$$

где A — предельное значение давления, МПа;

t — время протекания процесса, сут.;

a, b — параметры логистической кривой.

Для описания рассматриваемого процесса зависимость (2) представим в модифицированном виде:

$$P(t) = \frac{\gamma H \cdot g \cdot 10^{-3}}{1 + a \cdot \exp \left[-b \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right) \right]}, \quad (3)$$

где $P(t)$ — величина давления в выработанном пространстве в момент времени t после прохода лавы, МПа;

γ — объемная масса пород, т/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

t — время после прохода лавы, сут.;

$l_{\text{п}}$ — шаг первичной посадки кровли, м;

v — средняя скорость подвигания очистного забоя, м/сут.;

$t_{\text{акт}}$ — продолжительность периода стабилизации горного давления, сут.

Отношение $l_{\text{п}}/v$ переносит начало кривой в точку, соответствующую времени посадки основной кровли, с которого да-

вление начинает умеренно расти. Параметр a определяет месторасположение кривой на временной оси. Его изменение смещает кривую вправо или влево. На крутизну центральной части кривой оказывает влияние значение параметра b .

На предварительной стадии обработки данные проверялись на аномальность по критерию Ирвина λ_p :

$$\lambda_p = \frac{|P_t - P_{t-1}|}{\sigma_p}, \quad (4)$$

где σ_p — среднеквадратичное отклонение результирующего признака (P).

Табличное значение $\lambda_{\text{табл}} = 1,1$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе наблюдений $n = 47$ превышает расчетные значения, следовательно, аномальные данные не выявлены.

Для нахождения параметров уравнения регрессии (3) исходная формула преобразуется к виду

$$\frac{\gamma g H \cdot 10^{-3}}{P(t)} - 1 = a \cdot e^{-b \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right)}. \quad (5)$$

Обозначив левую часть уравнения как Y , прологарифмируем уравнение (5):

$$\ln(Y) = \ln(a) - b \cdot \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right). \quad (6)$$

Проведя замену $\ln(Y) = D$, $\ln(a) = c$, получим линейное уравнение

$$D = c - b \cdot \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right). \quad (7)$$

Нахождение параметров выражения (7) сводится к решению системы уравнений методом наименьших квадратов:

$$\begin{cases} nc - b \cdot \sum \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right) = \sum D, \\ c \cdot \sum \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right) - b \cdot \sum \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right)^2 = \sum D \cdot \left(t + \frac{l_{\text{п}}}{v} - t_{\text{акм}} \right). \end{cases} \quad (8)$$

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

При решении системы (8) получены параметры: $b=0,111$, $c=-3,614$. Так как $c = \ln(a)$, тогда $a = e^{-3,614} = 0,027$.

Зависимость изменения давления в выработанном пространстве для рассматриваемых условий разработки [3] имеет вид

$$P(t) = \frac{5,886}{1 + 0,027 \cdot e^{-0,111 \cdot \left(t + \frac{10}{1,25} - 73 \right)}}, \text{ МПа. (9)}$$

На рисунке 1, кроме данных фактических замеров, показана аппроксимирующая их логистическая кривая.

Коэффициент детерминации уравнения регрессии (9) составил $R^2 = 0,966$, что подтверждает высокую взаимосвязь величины давления от времени после прохода лавы. Существенность уравнения в целом проверена по F -критерию Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,95$. Расчетное значение F -критерия ($F_p = 26,7$) превышает табличное его значение ($F_{табл} = 1,46$), т. е. уравнение статистически значимо. Средняя ошибка аппроксимации равна 19,3 %, следовательно, качество уравнения хорошее.

Логистическая зависимость (9) описывает процесс нарастания давления горных пород в выработанном пространстве лавы, ведущей разработку на глубине 240 м. По вертикали она ограничена величиной максимального давления $\gamma g H$, а по горизонтали — продолжительностью периода стабилизации давления $t_{акт}$.

Большинство шахт Донбасса ведет работы на глубинах около 1000 м, и, следовательно, интерес представляет значение давления в этих условиях разработки. Зная величину $t_{акт}$ (1), представляется возможным экстраполировать полученную зависимость (9) на глубины разработки, характерные для Донбасса. Задача сводится к нахождению параметров a и b зависимости (3) для различных глубин ведения очистных работ. Найти их значения возможно при предположении о геометрическом подобии систем $H-t_{акт}$, получаемых при переносе фактических данных работы [3] в другую систему, отличную от исходной масштабом.

На рисунке 2 горизонтальными линиями отмечены верхние границы нарастания давления при различных значениях H , а вертикальными линиями — длительность процесса стабилизации давления, соответствующей каждой величине асимптотического максимума функции (3).

При использовании метода наименьших квадратов найдены коэффициенты регрессии для различных глубин разработки (табл. 1).

На рисунке 3 показаны кривые для определения параметров зависимости (9).

Параметр a определяется по степенной зависимости

$$a = 0,256 \cdot H^{-0,42} = 0,37/t_{акт} . \quad (10)$$

Аналогично находится параметр b :

$$b = 11,05 \cdot H^{-0,84} = 8,08/t_{акт} . \quad (11)$$

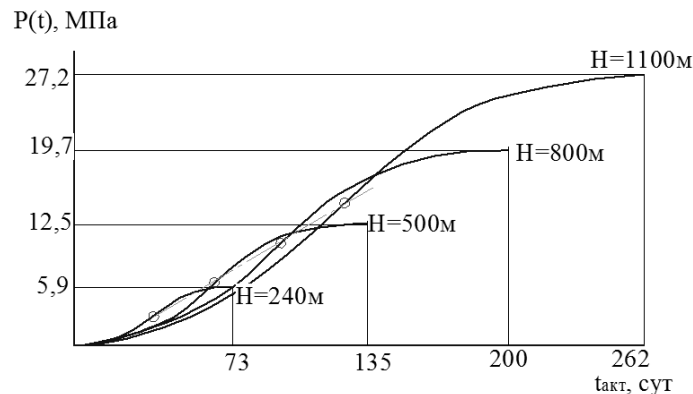


Рисунок 2 — Границы логистической кривой (3) при различной глубине разработки

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

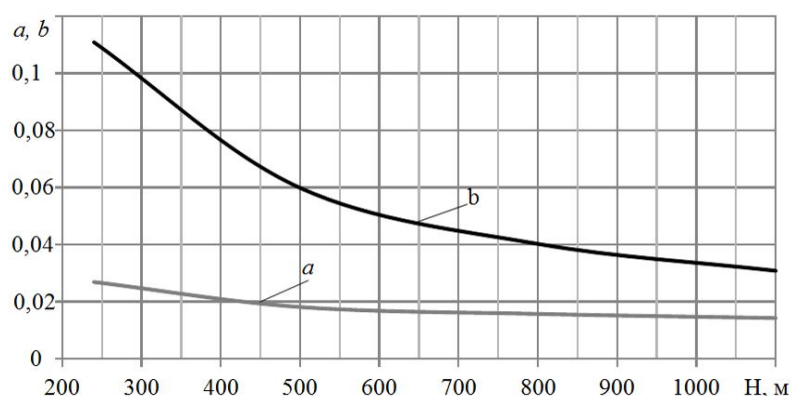


Рисунок 3 — Определение значений параметров a и b уравнения регрессии (3)

Таблица 1
Значения коэффициентов регрессии (3) a и b при различных глубинах ведения работ

$H, м$	$t_{акт}, сут$	a	b
240	73	0,027	0,111
500	135	0,0182	0,0599
800	200	0,0158	0,0403
1100	262	0,0143	0,0309

Для определения величины давления на почву отработанного пласта по мере продвижения очистного забоя предложен следующий алгоритм:

1) рассчитывается длительность активного периода оседаний земной поверхности, равная времени стабилизации горного давления на почву отработанного пласта, по эмпирической степенной зависимости (1);

2) по зависимостям (10) и (11) определяются значения параметров a и b для конкретной глубины разработки;

3) по зависимости (3) рассчитывается величина давления на почву отработанного пласта на конкретный момент времени после прохода лавы.

Список источников

1. Зборщик М. П. *Охрана выработок глубоких шахт в выработанном пространстве*. К. : Техника, 1978. 176 с.
 2. Установление времени стабилизации горного давления на почву извлеченного пласта / О. Л. Кизияров, О. Г. Доценко, Г. А. Аверин, Н. В. Гришко // *Сборник научных трудов ДонГТИ*. 2021. Вып. 24 (67). С. 25–32.
 3. Гапанович Л. Н., Гайдуков Ю. Г., Лаврухин В. Н. *Исследование закономерностей проявления горного давления в выработанном пространстве при выемке угля слоями в Челябинском бассейне* // *Уголь*. 1974. № 2. С. 13–18.

Выводы и направление дальнейших исследований. Оседание подработанного очистными работами массива и стабилизация горного давления в выработанном пространстве лавы взаимосвязаны между собой и имеют одинаковую продолжительность.

Изменение давления в выработанном пространстве проходит в три этапа: умеренного роста, интенсивного роста и стабилизации. Для его описания подходит логистическая кривая, ограниченная по вертикали величиной максимально возможного давления γH , а по горизонтали — продолжительностью активного развития сдвижений массива $t_{акт}$. Предложены эмпирические зависимости для определения величины давления на почву отработанного пласта, создаваемого обрушенными и уплотненными породами.

Дальнейшие исследования будут направлены на обоснование параметров крепления горных выработок, проводимых по обрушенным уплотненным породам.

4. Кынин А. Т., Привень А. И. Простейшие модели развития технических систем / Методолог : [сайт]. [2017]. URL: <http://www.metodolog.ru/node/940>.

5. Dotsenko, O. Pressure variation of caved rocks in mined-out area of face / O. Dotsenko // School of Underground Mining : 7th international conference. Dnepropetrovsk : NGU, 2013. P. 217–221.

© Доценко О. Г., Кизияров О. Л., Аверин Г. А.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ГБП ДонГТУ Леоновым А. А.,
зам. гл. инженера по производству и перспективному развитию
ПП «Шу „Луганское“» ГУП ЛНР «РТК „Востокуголь“» Чепурным Д. С.**

Статья поступила в редакцию 14.12.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Доценко Ольга Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент каф. геотехнологий и безопасности производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: dotcenkoo@mail.ru

Кизияров Олег Леонидович, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. геотехнологий и безопасности производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Аверин Геннадий Алексеевич, канд. техн. наук, доцент каф. геотехнологий и безопасности производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

***Dotsenko O. G., Kiziyarov O. L., Averin G. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: dotcenkoo@mail.ru)

IDENTIFYING THE PRESSURE VARIATION OF GOB ROCKS IN THE WORKED-OUT AREA ON THE LAYER SOIL OVER TIME

The article presents the results of the experimental data approximation on pressure-response data on the spent layer by means of the time-modified logistic Pearl-Reed function. There have been obtained the dependencies that define how rock pressure builds up in the worked-out area to mining depths typical for Donbass (up to 1100 m).

Key words: ground pressure of layer excavation, gob rock, worked-out area, stabilization of rock pressure, mining depths, S-curve, extrapolation.

References

1. Zborshchik M. P. Protecting deep mine workings in the worked-out area [Ohrana vyrabotok glubokih shaht v vyrabotannom prostranstve]. K. : Tekhnika, 1978. 176 p. (rus)

2. Kiziyarov O. L., Dotsenko O. G., Averin G. A., Grishko N. V. Determining the time required for stabilization of rock pressure on the soil of the excavated layer [Ustanovlenie vremeni stabilizacii gornogo davleniya na pochvu izvlechennogo plasta]. Scientific work collection of DonSTI. 2021. Iss. 24 (67). Pp. 25–32. (rus)

3. Gapanovich L. N., Gajdukov Yu. G., Lavruhin V. N. Examining the patterns of rock pressure manifestations in the worked-out area while extracting coal layers from the Chelyabinsk basin

[Issledovanie zakonornostej proyavleniya gornogo davleniya v vyrabotannom prostranstve pri vyemke uglya slojami v Chelyabinskoy bassejnej]. Ugol'. 1974. No. 2. Pp. 13–18. (rus)

4. Kynin A. T., Priven' A. I. Simple models of development of technical systems [Prostejshie modeli razvitiya tekhnicheskikh sistem]. Metodolog. 2017. URL: <http://www.metodolog.ru/node/940>.

5. Dotsenko O. Pressure variation of caved rocks in mined-out area of face. School of Underground Mining : 7th international conference. Dnepropetrovsk : NGU, 2013. Pp. 217–221.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dotsenko Olga Gennadiyevna, PhD in Engineering, Assistant professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: dotcenkoo@mail.ru

Kiziyarov Oleg Leonidovich, PhD in Engineering, Assistant professor, Head of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbas State Technical University
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Averin Gennadiy Alekseyevich, PhD in Engineering, Assistant professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

МЕТАЛУРГИЯ

METALLURGY

УДК 669.04

Куберский С. В., *Крестин Р. В., Саратовский Р. Н., Сервитовский Я. Ю.*Донбасский государственный технический университет***E-mail: Jacks.m3x@mail.ru*

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПУЛЬСАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ

Усовершенствована физическая модель сталеразливочного ковша для исследования пульсирующей продувки расплава через две пористые пробки. Предложенные изменения позволяют расширить возможности управления возникающими газодинамическими потоками в условиях реального времени и их визуализацию. Получены результаты, свидетельствующие о преимуществах пульсирующей продувки в сравнении со стационарной. Использование усовершенствованной модели обеспечит развитие теоретических представлений о механизмах гомогенизации расплавов, вторичного окисления и удаления неметаллических включений, что позволит предложить рекомендации для повышения эффективности технологии внепечной обработки.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, внепечная обработка стали, стационарная продувка, пульсирующая продувка, физическое моделирование, гомогенизация, вторичное окисление, неметаллические включения, рафинирование.

Процесс продувки металла инертными газами является одним из важных этапов современных технологий производства стали. Он используется для гомогенизации химического состава и температуры расплава, а также рафинирования его от газов и неметаллических включений. Эффективность такого способа обработки в значительной степени зависит от интенсивности подачи инертного газа, его расхода и количества продувочных узлов. Увеличение расхода газа и использование большего числа пробок ускоряет процессы выравнивания химического состава и температуры стали в объеме ковша. Однако более интенсивная продувка способствует повышению расхода инертного газа и огнеупоров, а также оголению зеркала и увеличению площади контакта расплава с окружающей средой, что способствует развитию процессов вторичного окисления. Кроме того, высокая стоимость продувочных узлов оказывает негативное влияние на величину расходов по переделу.

Поэтому необходимо искать новые технические и технологические решения, способствующие повышению эффективности процесса продувки стали инертными газами.

Одним из таких решений может быть переход от традиционной стационарной продувки расплава инертным газом к использованию пульсирующей его подачи. Это позволит уменьшить расход газа, сократить время для достижения однородности расплава и уменьшить интенсивность вторичного окисления расплава. Кроме того, такой подход будет положительно сказываться на стойкости огнеупорной футеровки.

Постановка задачи. Наибольшее распространение для изучения газодинамических процессов, имеющих место при обработке высокотемпературных расплавов в сталеразливочном ковше, получило физическое моделирование, включающее в себя постановку задачи, вывод и анализ условий подобия, выбор конструкции и расчет параметров модели объекта исследования, проведение экспериментов на модели и анализ полученных результатов [1].

Для моделирования процессов продувки расплава в сталеразливочном ковше была разработана его физическая модель в масштабе 1:8 относительно промышленного объекта [2]. Общий вид физической модели представлен на рисунке 1, а. Расположение двух продувочных узлов физической моде-

ли (рис. 1, б) соответствовало их расположению на промышленном объекте, включая удаление от вертикальной оси ковша.

Стоит обратить внимание на то, что у геометрически подобных систем должны быть постоянными соотношения площадей и объемов:

$$\frac{S_H}{S_M} = m^2 = const \text{ и } \frac{V_H}{V_M} = m^3 = const, \quad (1)$$

где S_H , S_M — соответственно площадь натурального объекта и физической модели;

V_H и V_M — соответственно объем натурального объекта и физической модели.



а



б

а — общий вид физической модели;
б — расположение продувочных узлов

Рисунок 1 — Общий вид физической модели

В качестве жидкости, моделирующей сталь и шлак, использовали воду и машинное масло различной вязкости, а в качестве продувочного газа — сжатый воздух. Подача воздуха осуществлялась от компрессора через газовый счётчик с последующим распределением на два продувочных узла по воздушным расходомерам.

Несколько физических систем могут быть геометрически подобными, если между их соответствующими размерами существует постоянное соотношение [3]:

$$\frac{H_H}{H_M} = \frac{D_H}{D_M} = \frac{d_H}{d_M} = \frac{l_H}{l_M} = m = const, \quad (2)$$

где H_H , H_M — высота сталеразливочного ковша натурального объекта и физической модели;

D_H , D_M — диаметр натурального объекта и физической модели в верхней части ковша;

d_H , d_M — диаметр натурального объекта и физической модели в нижней части ковша;

l_H , l_M — расстояние между продувочными узлами натурального объекта и физической модели.

Для определения влияния параметров продувки (расход аргона, количество продувочных узлов, режимов продувки) на динамику перемешивания расплава в ковше использовали методику, описанную в работе [2]. Однако в процессе проведения исследований были отмечены следующие недостатки физической модели, представленной на рисунке 1:

- отсутствие возможности отдельного регулирования расхода воздуха на каждый продувочный узел;

- отсутствие оперативного изменения режимов в ходе обработки и необходимость полной остановки процесса при переходе от одного режима продувки к другому;

- используемые для генерации переменного тока на датчики аккумуляторы не обеспечивали требуемых значений выходного напряжения.

Поэтому основная **цель** данной работы предусматривала усовершенствование существующей модели для повышения эффективности управления режимами продувки, регистрации параметров и визуализации процесса.

Объект исследования — технологический процесс аргонной продувки расплава в сталеразливочном ковше.

Предмет исследования — физическое моделирование технологических параметров процесса при пульсирующей подаче продувочного газа.

Задачи исследования:

– усовершенствование физической модели пульсирующей продувки расплава в сталеразливочном ковше;

– оценка времени гомогенизации модельной жидкости по рабочему объему физической модели при стационарном и пульсирующем режиме подачи продувочного газа;

– анализ влияния пульсирующей подачи продувочного газа на процесс гомогенизации модельной жидкости;

– определение направления последующих исследований рассматриваемого процесса.

Методика исследования. На первом этапе исследований в существующую модель были внесены следующие усовершенствования:

– установлены расходомеры РСМ-15 на каждый продувочный узел (рис. 2), позволяющие автономно определять расход продувочного газа;

– для реализации различных режимов продувки был разработан блок управления клапанами (рис. 3).

Данное устройство позволяет преобразовать выходной сигнал низкой частоты в диапазоне 0,3–6 Гц со звуковой карты компьютера в сигнал для управления двумя 12-вольтовыми клапанами, обеспечивая одинаковое время включенного и выключенного состояния клапана. Два электромагнитных клапана, используемые для подачи воздуха к продувочным узлам, могут работать по трем основным режимам:

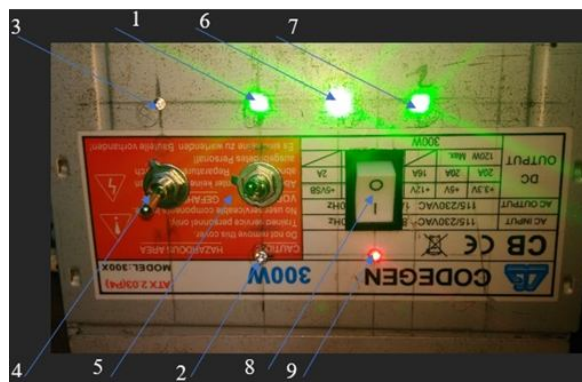
– одинаковая частота при синхронном открытии и закрытии клапанов;

– одинаковая частота при асинхронном открытии и закрытии клапанов;

– различная частота открытия и закрытия каждого клапана.



Рисунок 2 — Поплавковый расходомер газа РСМ-15



- 1, 2, 3, — диоды, сигнализирующие о включении соответствующего режима работы;
 4, 5 — тумблеры переключения режимов;
 6, 7 — диоды, сигнализирующие о работе левого и правого клапана; 8 — кнопка включения/отключения питания на клапаны;
 9 — диод подачи питания на клапаны

Рисунок 3 — Блок управления клапанами

Также появилась возможность смешанного режима продувки, при котором один клапан обеспечивает стационарный режим, а второй — пульсирующий. При этом расход продувочного газа на каждую пробку и частота пульсаций могут быть одинаковыми либо разными.

Было принято решение использовать блок синхронизации, содержащий восемь независимых дифференциальных входов, имеющих гальваническую развязку. Восемь датчиков подключались к цепи переменного тока, сформированного восемью независимыми источниками напряжения (5 В), и погружались в измеряемую среду (воду, солевой раствор). При измерении в чистой воде и солевом растворе напряжение на входе составляло 0–0,1 В и 4,2–4,8 В соответственно. В процессе измерения взаимное влияние показаний датчиков отсутствовало ввиду их гальванической развязки.

Внешний вид блока синхронизации датчиков представлен на рисунке 4.

Используемая на модели система позволяла обеспечить частоту подачи воздуха в диапазоне 1–300 пульсаций в минуту. При выборе расхода газа для моделирования процессов продувки были использованы данные действующего промышленного объекта. В частности, в условиях ООО «ЮГМК» продувка стали аргоном в ковшах ёмкостью 300 т через два продувочных узла осуществляется на протяжении всей обработки металла на АКП. При неудовлетворительной работе продувочной пробки либо при необходимости интенсификации массообменных процессов используется кратковременная или длительная подача аргона высокого давления (байпас) без оголения зеркала металла для пробивания продувочной пробки (1–3 мин) и для проведения процесса десульфурации до ввода алюминиевой проволоки. При выполнении данных технологических операций расход аргона составляет 250–600 л/мин. После введения в жидкий металл алюминиевой проволоки, а также после ввода порошковой проволоки, содержащей кальций, произво-

дят мягкую продувку расплава продолжительностью не менее 3 мин без оголения зеркала металла при расходе аргона 100–300 л/мин. Обеспечение гомогенизации состава и температуры расплава производится не менее 20 мин при расходе аргона 100–250 л/мин [4].

Для определения расхода вдуваемого газа на холодной физической модели использовалась формула [5]:

$$Q_M = \sqrt{\left(\frac{D_M}{D_H}\right)^5 \cdot \frac{\rho_G^M}{\rho_G^H} \cdot \frac{\rho_{Ж}^H - \rho_G^H}{\rho_{Ж}^M - \rho_G^M}} \cdot Q_H \quad (3)$$

где D_M и D_H — характерный размер для модели и натуре соответственно, м; ρ_G^M , ρ_G^H и $\rho_{Ж}^M$, $\rho_{Ж}^H$ — плотность жидкости и газа, кг/м³; Q_H — расход газа на объекте, м³.

Расчетные по формуле (3) значения расхода вдуваемого воздуха на один продувочный узел на модели представлены в таблице 1.



Рисунок 4 — Блок синхронизации датчиков

Таблица 1
Значения расхода вдуваемого газа

№	Расход газа на объекте, л/мин	Расход газа на модели, л/мин
1	50	1
2	100	2
3	150	3
4	200	4
5	250	5
6	300	6
7	350	7

Одним из наиболее эффективных методов определения степени гомогенизации модельной жидкости является электрохимический метод с введением в моделируемый раствор определенного количества раствора поваренной соли и одновременным измерением напряжения в различных точках объема модели с помощью специальных датчиков [6]. Повышение напряжения на датчике обусловлено тем, что при растворении в воде хлорида натрия он распадается на ионы (Na^+ и Cl^-), которые могут свободно передвигаться в растворе. Концентрация NaCl в растворе непосредственно влияет на его электропроводность. Чем выше концентрация раствора, тем больше ионов Na^+ и Cl^- в нем и выше его электропроводность [7].

Перед проведением эксперимента по электрохимическому определению времени гомогенизации модельной жидкости необходимо провести калибровку датчиков. Для этого все используемые датчики одновременно помещались в чистую воду, включался блок синхронизации, подающий напряжения на датчики, и запускалось программное обеспечение LGraph2, в рабочем окне которого отображаются разноцветные линии напряжения, характерные для каждого из датчиков.

Показания, получаемые от каждого из датчиков, позволяют оценить степень однородности модельного раствора в объеме ковша после добавления электролита. Чтобы получить информацию от датчиков, они были подключены через блок синхронизации к аналогово-цифровому преобразователю АЦП (E-154), который подключен к компьютеру с установленным программным обеспечением LGraph2.

В чистой воде все датчики показывают напряжение, равное или близкое к 0 В. Затем датчики погружали в раствор NaCl определенной концентрации.

Опытным путем было определено, что концентрация NaCl в растворе должна составлять 0,5 %, что обусловлено рабочим

диапазоном напряжений блока синхронизации (0–5 В). При обеспечении данной концентрации соли в растворе напряжение на датчиках должно находиться в диапазоне 2,5–3,0 В. При отклонении датчиков от этого диапазона производится подстройка значений регулируемым резистором.

После калибровки отключали устройство, вытирали датчики насухо и располагали их вблизи стенок (4 датчика), днища ковша (2 датчика), а также в центре физической модели (2 датчика) с помощью быстросъемных фиксаторов (рис. 5).

Для того чтобы в общем объеме модели (92 л) концентрация соли достигала 0,5 % при температуре окружающей среды (10 °С), необходимо приготовить раствор из 470 г NaCl и 1,5 л воды. После проведения всех приготовлений:

- ковш заполняли водой до отметки в 90 л;
- ресивер компрессора наполняли до максимального объема (25 л);
- открывали воздушный клапан с ранее выставленным расходом воздуха на расходах;
- запускали запись данных в программе LGraph2;
- выливали приготовленный солевой раствор в модель ковша, заполненную чистой водой.

Так как раствор имеет большую плотность по сравнению с чистой водой, он погружался на дно и вовлекался в перемешивание; при подходе его к датчикам величина фиксируемого напряжения была близка к 5 В и в ходе эксперимента непрерывно снижалась. Через определенное время показания на всех датчиках выравнивались, что свидетельствовало об усреднении модельного раствора и окончании эксперимента. В этом случае нажатием кнопки «стоп» в программе LGraph2 заканчивали запись и сохраняли данные в двух форматах (изображение с показаниями напряжений и текстовый массив данных с цифровыми значениями) для дальнейшей обработки и построения графиков.

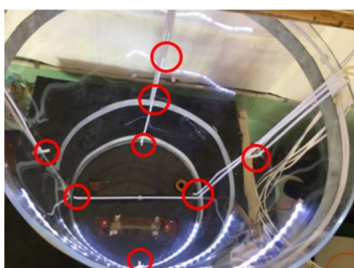


Рисунок 5 — Расположение считывающих датчиков

На рисунке 6 представлены наглядные результаты электрохимического метода измерения гомогенизации, отображаемые в программе LGraph2.

Для оценки работоспособности усовершенствованной модели были проведены эксперименты, предусматривающие стационарную и пульсирующую подачу воздуха в модельную жидкость.

При стационарном режиме продувки два продувочных узла постоянно находились в открытом положении и обеспечивали расход воздуха 6 л/мин (по 3 л на каждый продувочный узел). Обработка результатов экспериментов в Excel позволила определить среднее время гомогенизации модельной жидкости (по трём опытам), которое составило 40 с.

Вторая серия опытов предусматривала синхронный пульсирующий режим продувки, когда оба клапана работают с одной частотой и открываются и закрываются одновременно. Расход продувочного газа был идентичен стационарному, но клапаны открывались с частотой 30 пульсаций в минуту (п/мин), то есть время открытого и закрытого состояния клапана было одинаковым (каждый клапан открывался на 1 с, а затем закрывался на такое же время). Выбор данной частоты обусловлен тем, что в работе [2] при низкой частоте пульсаций в момент паузы оголившееся зеркало воды (в реальных условиях расплава) успевало заново покрыться маслом (в реальных условиях шлаком), что в реальных условиях обеспечит значительное снижение интенсивности процессов вторичного окисления расплава в результате его взаимодействия с кислородом и азотом воздуха окружающей среды.

Среднее время гомогенизации модельной жидкости при использовании пульсирующей подачи воздуха (по трём опытам) составило 36,50 с.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунке 7.

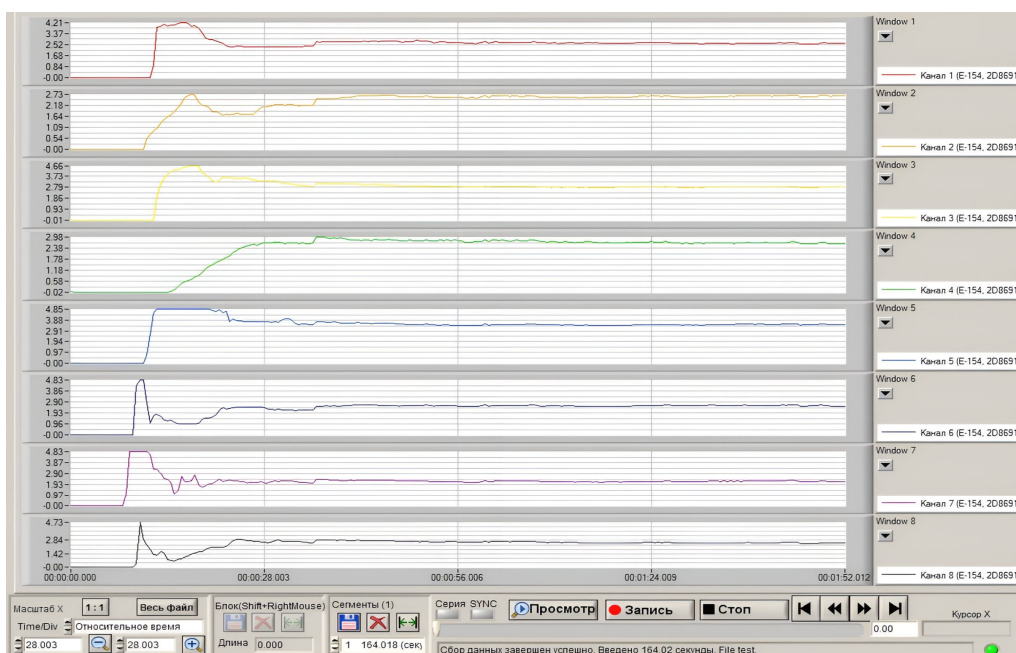


Рисунок 6 — Результат электрохимического метода изменения гомогенизации расплава

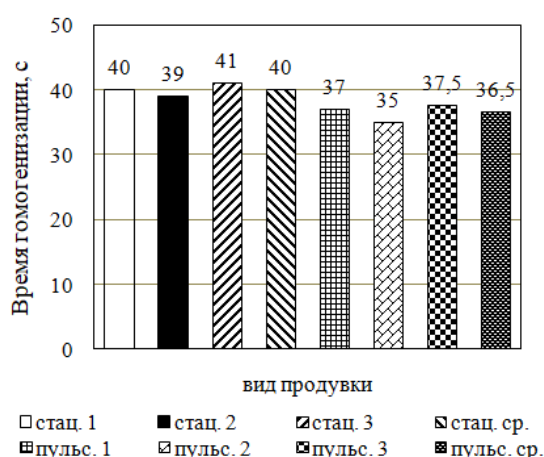


Рисунок 7 — Время, затраченное на гомогенизацию модельной жидкости при различных режимах продувки

Данные, представленные на рисунке 6, свидетельствуют о том, что при использовании пульсирующего режима продувки время, затрачиваемое на гомогенизацию модельной жидкости, уменьшается более чем на 9 % в сравнении со стационарным режимом работы продувочных узлов, несмотря на одинаковый расход продувочного газа. Это способствует увеличению эффективно-

сти процесса, экономии времени и снижению общих энергозатрат на обработку.

Выводы и направления дальнейших исследований.

1. Усовершенствована физическая модель сталеразливочного ковша, позволяющая исследовать процессы аргонной продувки железоуглеродистого расплава с использованием пульсирующей подачи рафинировочного газа.

2. Показано, что при пульсирующей продувке и одинаковом расходе продувочного газа время гомогенизации раствора уменьшается более чем на 9 % в сравнении со стационарной продувкой, что обеспечит повышение производительности АКП и снижение расходов по переделу.

Дальнейшие исследования будут направлены на проведение многофакторных экспериментов с использованием широких диапазонов расходов газа, количества пульсаций, а также различных технологий подачи продувочного газа, в т. ч. процессов совмещенной продувки, когда на одной пробке реализуется стационарный режим, а на второй — пульсирующий.

Список источников

1. Еронько С. П., Быковских С. В. *Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разлива стали*. К. : Техника, 1998. 136 с.
2. Куберский С. В., Романчук Я. А., Саратовский Р. Н. *Физическое моделирование пульсационного перемешивания металла в сталеразливочном ковше // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 23 (66). С. 47–55.*
3. Цымбал В. П. *Математическое моделирование металлургических процессов*. М. : Металлургия, 1987. 239 с.
4. *ТИ 229-СТ ККП-0117-151-2023. Технологическая инструкция по обработке стали на установке ковши-печь*. Алчевск : ООО «ЮГМК», 2023. 36 с.
5. Кутателадзе С. С. *Анализ подобия и физические модели*. Новосибирск : Наука, 1986. 296 с.
6. Смирнов А. Н., Жемеров С. Г. *Исследование процессов перемешивания металла в сталеразливочном ковше при продувке инертным газом [Электронный ресурс] // Украинская Ассоциация Сталеплавателей : [сайт]. [2018]. URL: <https://www.uas.su/articles/metequipment/00002/00002.php>.*
7. *Экспериментальное изучение влияния минерализации раствора NaCl и других солей на удельное электрическое сопротивление раствора / О. М. Пономаренко, К. А. Истомина, Л. Д. Макашева, Большаков М. Н. // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. № 4 (27). 8 с. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art7*

© Куберский С. В., Крестин Р. В., Саратовский Р. Н., Сервитовский Я. Ю.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Должиковым В. В.,
ведущим инженером технического отдела управления ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 15.12.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Куберский Сергей Владимирович, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Крестин Роман Валерьевич, аспирант каф. металлургических технологий

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: Jacks.m3x@mail.ru

Саратовский Руслан Николаевич, канд. техн. наук, директор НИПКИ «Параметр»

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: nipki@dstu.education

Сервитовский Ярослав Юрьевич, магистрант каф. металлургических технологий

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: servitovskaya@gmail.com

Kuberskiy S. V., *Krestin R. V., Saratovskiy R. N., Servitovskiy Ya. Yu. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: Jacks.m3x@mail.ru)

IMPROVEMENT OF THE PHYSICAL MODEL OF PULSATION MELT MIXING IN STEEL-POURING LADLE

A better-defined physical model of the steel-pouring ladle is used to analyze the pulsating blow of the liquid alloy through two porous plugs. The proposed modifications allow for extending the possibilities of controlling and visualizing emerging gas dynamic flows in real time. The advantages of a pulsating blow over a stationary one is shown in the results. The use of an advanced model will provide the development of theoretical understanding about melt homogenization, secondary oxidation, and non-metallic inclusion removal, which will allow to propose recommendations on improving the efficiency of secondary steelmaking technology.

Key words: steel-pouring ladle, secondary steelmaking, stationary blow, pulsating blow, physical modeling, homogenization, secondary oxidation, non-metallic inclusion, refining.

References

1. Eron'ko S. P., Bykovskih S. V. *Physical modeling of processes of secondary steelmaking and steel teeming [Fizicheskoe modelirovanie processov vnepechnoj obrabotki i razlivki stali]*. K. : Tekhnika, 1998. 136 p. (rus)
2. Kuberskiy S. V., Romanchuk Ya. A., Saratovskiy R. N. *Physical modelling of pulsation melt mixing in steel-pouring ladle [Fizicheskoe modelirovanie pul'sacionnogo peremeshivaniya metalla v stalerazlivochnom kovshe]*. Scientific works collection of DonSTI. 2021. Iss. 23 (66). Pp. 47–55. (rus)
3. Cymbal V. P. *Mathematical modeling of metallurgical processes [Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh processov]*. M. : Metalurgija, 1987. 239 p. (rus)

4. TI 229-ST KKP-0117-151-2023. *Technology guidelines for steel processing at the ladle furnace [Tekhnologicheskaya instrukciya po obrabotke stali na ustanovke kovsh-pech']*. Alchevsk : OOO "YuGMK". 2023. 36 p. (rus)

5. Kutateladze S. S. *Similarity analysis and physical models [Analiz podobiya i fizicheskie modeli]*. Novosibirsk : Nauka, 1986. 296 p. (rus)

6. Smirnov A. N., Zhemerov S. G. *Study of metal mixing processes in the steel-pouring ladle during blowing with inert gas [Issledovanie processov peremeshivaniya metalla v stalerazlivochnom kovshe pri produvke inertnym gazom]*. Ukrainskaya Associaciya Staleplavil'shchikov. 2018. (rus) URL: <https://www.uas.su/articles/metequipment/00002/00002.php>.

7. Ponomarenko O. M., Istomina K. A., Makasheva L. D., Bol'shakov M. N. *Experimental study of influence of solution NaCl mineralization and other salts on the electrical solution resistivity [Eksperimental'noe izuchenie vliyaniya mineralizacii rastvora NaCl i drugih solej na udel'noe elektricheskoe soprotivlenie rastvora]*. Aktual'nye problemy nefi i gaza. 2019. No. 4 (27) 8 p. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art7 (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Krestin Roman Valerievich, Postgraduate of the Department of Metallurgical Technologies
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: Jacks.m3x@mail.ru

Saratovskiy Ruslan Nikolayevich, PhD in Engineering, Director of the Research and Design Institute "Parameter"
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: servitovskaya@gmail.com

Servitovskiy Yaroslav Yurievich, Candidate for a Master's Degree of the Department Metallurgical Technologies
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: servitovskaya@gmail.com

УДК 621.771.2

Чичкан А. А., Денищенко П. Н., *Чумак Н. Ю.
 Донбасский государственный технический университет
 *E-mail: nikolay31302@gmail.com

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА УГЛОВОГО ПРОФИЛЯ ИЗ ШВЕЛЛЕРНОГО РАСКАТА В УСЛОВИЯХ СТАНА «600» ЮГМК СПОСОБОМ ПРОДОЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ

Работа посвящена разработке способа прокатки сдвоенного углового профиля швеллерного типа с последующим разделением перед правильной машиной. С использованием программного комплекса DEFORM-2D/3D проведено моделирование прочности концентратора напряжений (надрез с последующим его выравниванием), выполненного в чистовых клетях для обеспечения последующего деления.

Ключевые слова: прокатка с разделением, концентратор напряжений, моделирование процесса, энергосиловые параметры, критерий разрушения.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из перспективных направлений совершенствования и интенсификации процесса сортовой прокатки и производства заготовки является использование процесса многоручьевой прокатки-разделения. За рубежом этот процесс получил название «слиттинг-процесс», его широко применяют на различных станах горячей прокатки [1]. Суть процесса многоручьевой прокатки-разделения заключается в формировании из одной заготовки или слитка одновременно нескольких раскатов, сочлененных между собой по ширине, и последующем их продольном разделении в черновых клетях с обжатием отдельных раскатов в чистовых клетях.

Есть возможность применения прокатки сдвоенного углового профиля в условиях стана «600» ЮГМК. Для производства уголка № 10 по ГОСТ 8509 применить разделение сдвоенного профиля в черновых клетях невозможно, так как раскат передается между линиями клетей шлепперами; поэтому возможно разделение либо в чистовой клети, либо в специальном, отдельно стоящем устройстве. Для того чтобы уйти от проблем с одновременной порезкой 2-х раскатов (невозможность подачи рычажным толкателем 2-х раскатов на

порез), разделение раската решено производить специальным устройством на входе в правильную машину.

Для успешного деления раската в холодном состоянии калибровка валков предчистовой клети должна быть выполнена с уступом, наносящим надрез на горизонтальном элементе профиля с полным его выравниванием в последующей клети. Однако при выполнении этих операций возможно получение разрывов по линии надреза, что непременно приведет к аварийной остановке стана и возможным поломкам валков из-за «окова» их полосой.

Поэтому актуальным вопросом является определение величины критерия разрушения, показывающего возможность разрыва при нанесении надреза с последующим его выравниванием при различных технологических параметрах прокатки, что требует всестороннего изучения данного процесса.

Постановка задачи. Так как станы горячей прокатки отличаются значительными колебаниями технологических параметров, влияющих на энергетические характеристики при обжатии металла, то существует необходимость в разработке компьютерной модели процесса прокатки с совмещением обжатия и дополнительных операций по выполнению надреза по

оси раската и его выравниванию в последующей клетке.

В связи с этим *целью* настоящей работы явилась разработка технологии производства углового профиля из швеллерного раската на основе компьютерного моделирования процесса надреза-выравнивания швеллерного раската в последних клетях стана «600» перед разделением его на два уголка.

Объект исследования — технологический процесс прокатки в клетях стана «600» швеллерного профиля с возможностью получения, после разделения, двух угловых профилей.

Предмет исследования — очаги деформации при совмещении обжатия и дополнительных операций по выполнению надреза по оси раската и его выравниванию в последовательно расположенных клетях для осуществления продольного разделения полосы.

Задачи исследования:

– разработка технологии прокатки швеллерного профиля с нанесением специального надреза и последующим его выравниванием для облегчения разделения раската на два уголка в холодном состоянии;

– оценка влияния технологических параметров прокатки на стабильность разработанной технологии по совмещению обжатия с нанесением надреза по продольной оси раската и дальнейшим выравниванием его в последующей клетке;

– получение значений критерия разрушения полосы при применении разработанной технологии в зависимости от изменения технологических параметров прокатки.

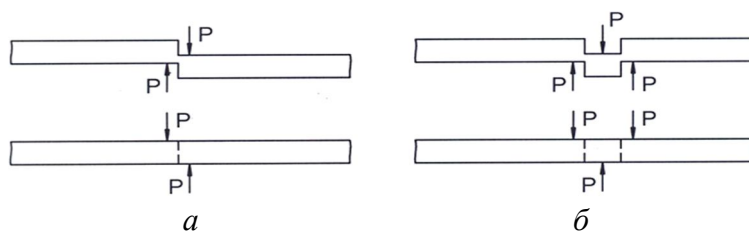
Методика исследования. Моделирование разработанного технологического про-

цесса выполнено с использованием метода конечных элементов при помощи программного комплекса DEFORM-2D/3D. Подготовка геометрических характеристик раскатов и формы калибров для осуществления надреза и выравнивания выполнено в программном комплексе КОМПАС-3D.

Изложение материала. Одним из перспективных направлений в области интенсификации прокатного производства является многоручьевая прокатка-разделение. Ее сущность заключается в формировании из одной заготовки одновременно нескольких профилей, сочлененных между собой по ширине, с последующим их разделением. Применение прокатки-разделения на действующих станах без значительных затрат и специального оборудования обеспечивает резкое повышение производительности стана, экономию энергозатрат и материальных ресурсов.

При разработке технологии следует обеспечить порезку пакета из двух раскатов на пилах горячей резки, нормальную передачу на холодильник и предотвращение перепутывания раскатов после разделения.

Существует способ изготовления профилейных изделий, заключающийся в прокатке сдвоенных профилей и разделении их в холодном состоянии, отличающийся тем, что с целью уменьшения усилий разделения при прокатке в плоскости разделения профилей создается продольный концентратор напряжения путем сдвига одной части профиля относительно другой (рис. 1) и последующего их возврата в исходное положение [2].



a — одинарный концентратор напряжений; *б* — двойной концентратор напряжений

Рисунок 1 — Способ продольного разделения

МЕТАЛЛУРГИЯ

В процессе исследования сдвоенной прокатки полосульбы было установлено, что углубление канавок на раскате и уменьшение зазора между режущими кромками в чистовом калибре способствует притуплению кромок и уменьшению высоты получаемых при продольном разделении заусенцев (0,5–0,7 мм в первом случае и 0,3–0,5 мм — во втором) [3].

Известен способ получения тавровых профилей, когда в первых проходах прокатка ведется по способу получения обычных двутавров, а затем в 2-х калибрах, предшествующих чистовому, последовательно по плоскости будущего деления валками осуществляется неполный надрез, подобный дисковым ножницам.

В чистовом калибре обе половины стенки сдвигают в противоположном направлении. В процессе этого сдвига происходит обрыв образовавшейся ранее перемычки, что приводит к полному разделению стенки на две части, и из чистовой клетки в результате выходит два тавровых профиля. При опытной прокатке было прокатано 800 т тавров, часовая производительность возросла с 12,4 до 18,7 т/ч [1].

Был разработан способ получения угловых профилей на мелкосортном стане. При применении данного способа предусматривалось формирование специальной полосы с двумя продольными ребрами — будущими углами углового профиля — и с желобками в средней части полосы — будущим местом продольного разделения. Затем, в одной из горизонтальных клеток чистовой группы специальными калиброванными валками (за счет сдвига одной части профиля относительно другой) производилось продольное разделение полосы на два угловых профиля [4].

В 1974 году фирмой British steel corp. разработан способ [5] изготовления металлического сортового проката. В этом способе использован изгиб для разрушения перемычки, соединяющей сдвоенный профиль одновременно по всей длине штанги с помощью специального устройства. Устройство предназначено для таврового, углового и другого сечения.

Рассмотрим возможность применения прокатки сдвоенного углового профиля в условиях стана «600» ЮГМК (рис. 2).

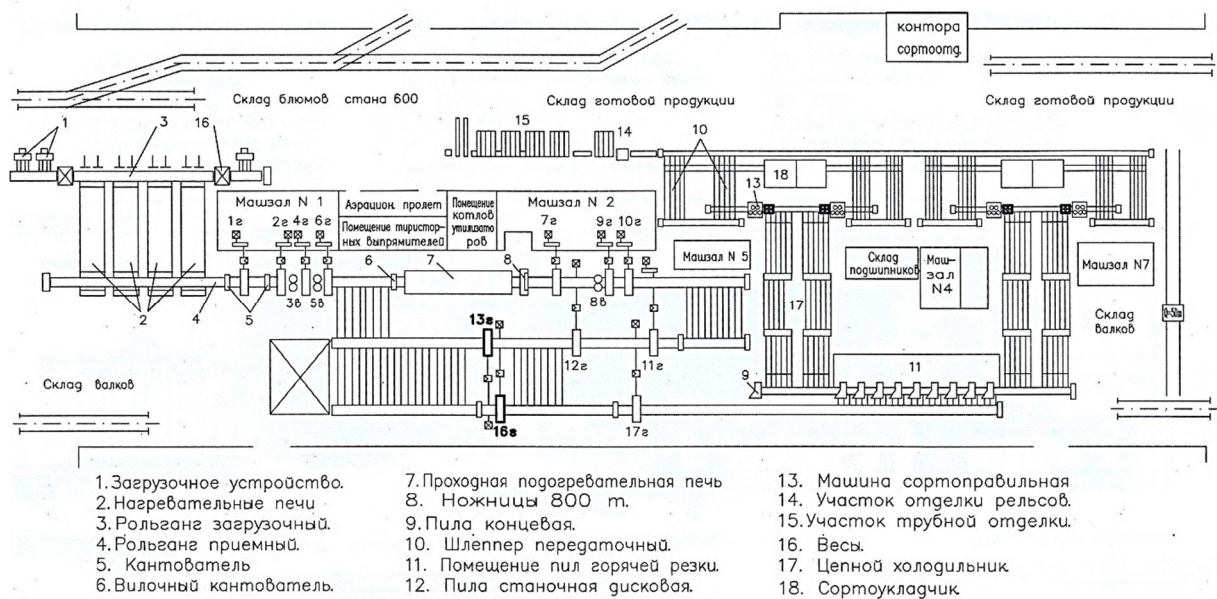
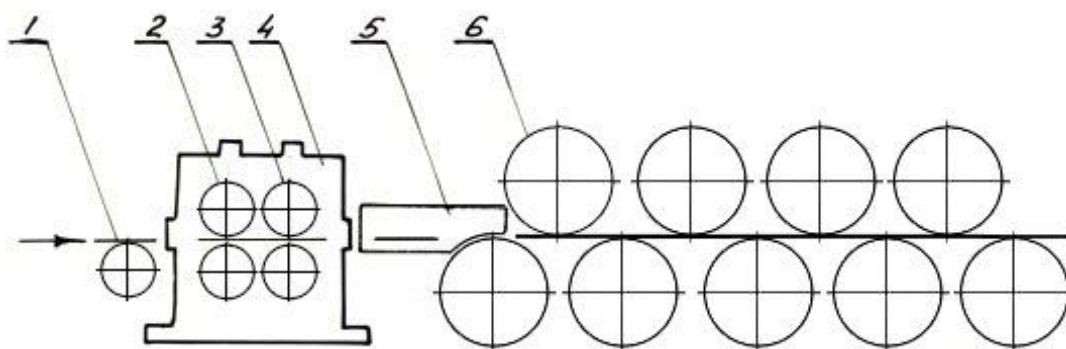


Рисунок 2 — Схема расположения оборудования стана «600»

Для производства уголка № 10 по ГОСТ 8509 [6] применить разделение сдвоенного профиля в черновых клетях невозможно, так как раскат передается после клетки № 13Г шлеппером, поэтому возможно разделение либо в чистовой клети, либо в специальном, отдельно стоящем устройстве. Жирным на рисунке 2 выделено оборудование, участвующее в предлагаемом технологическом процессе. Для того чтобы уйти от проблем с одновременной порезкой 2-х раскатов (невозможность подачи рычажным толкателем 2-х раскатов на порез), разделение раската лучше всего производить специальным устройством на входе в правильную машину (рис. 3).

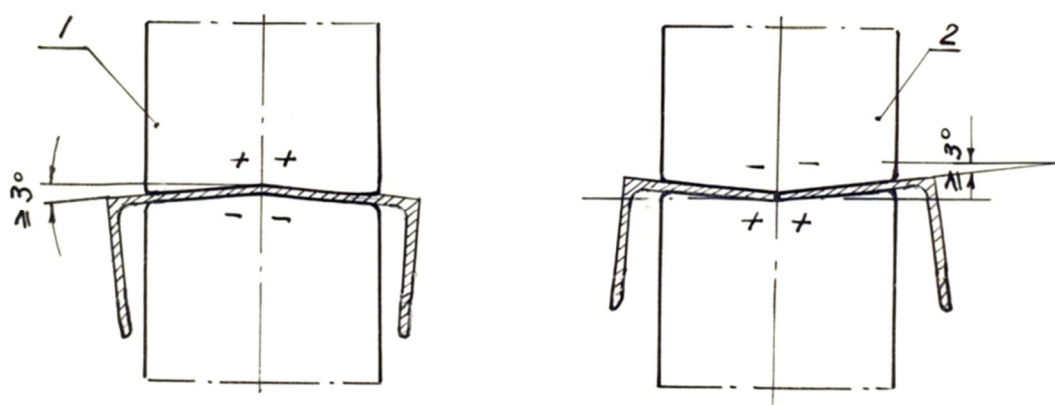
Предлагаемое устройство будет снабжено двумя парами роликов, в которых будет производиться знакопеременный излом полосы (рис. 4).

Предлагаемая схема производства будет состоять из прокатки специального профиля швеллерного типа с нанесением продольного концентратора напряжения специально откалиброванными валками клетки № 13Г. В последующей клети (№ 16Г) производится сдвиг продольного надреза в обратном направлении (выравнивание), чистовая клеть (№ 17) подгибает фланцы и выравнивает горизонтальный элемент профиля.



1 — задающий рольганг; 2 — входная пара роликов устройства; 3 — выходная пара роликов устройства; 4 — корпус устройства; 5 — направляющие линейки правильной машины; 6 — ролики правильной машины

Рисунок 3 — Схема расположения устройства для разделения сдвоенного профиля



1 — входная пара роликов; 2 — выходная пара роликов

Рисунок 4 — Профилировка роликов устройства для разделения полосы

После прокатки, порезки на пилах горячей резки и охлаждения на холодильнике сдвоенный профиль подается в ролики разделяющего устройства. Для удешевления конструкции возможно изготовление устройства с приводными только нижними роликами. После разделения две полосы уголка № 10 при помощи направляющих линеек (рис. 3) одновременно будут заданы в ролики правильной машины 9×800 с двумя ручьями для правки. После правки и осмотра на инспекторском стеллаже готовые профили либо упаковываются для отгрузки, либо отправляются на отделочные участки для удаления заусенцев.

Однако при выполнении специальных надрезов в клети № 13Г с последующим выравниванием в клети № 16Г возможно получение разрывов по линии надреза, что непременно приведет к аварийной остановке стана и возможным поломкам из-за окова валков полосой.

Для предупреждения таких ситуаций с использованием программного комплекса DEFORM-2D/3D была разработана компьютерная модель процесса надреза-выравнивания швеллерного профиля в последних клетях стана «600» перед разделением на два уголка.

Для моделирования использовались данные, рассчитанные в калибровке швеллерного профиля. Чертеж калибра с нанесением надреза на горизонтальный элемент профиля приведен на рисунке 5, калибр с выравниванием — на рисунке 6.

Файлы геометрии калибров и сечений раскатов были подготовлены в программном комплексе КОМПАС-3D, сохранены в формате трёхмерного тела с расширением .stl и перенесены в комплекс DEFORM-2D/3D для моделирования (рис. 7).

После ввода данных получаем позиционирование раската относительно калибра (рис. 8).

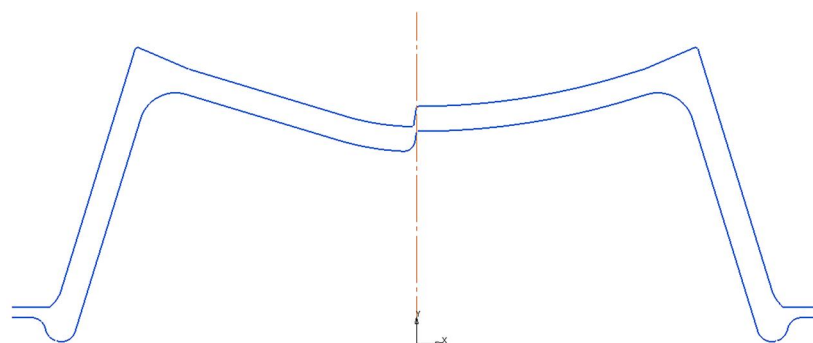


Рисунок 5 — Чертеж калибра клети № 13Г с нанесением надреза на горизонтальный элемент профиля

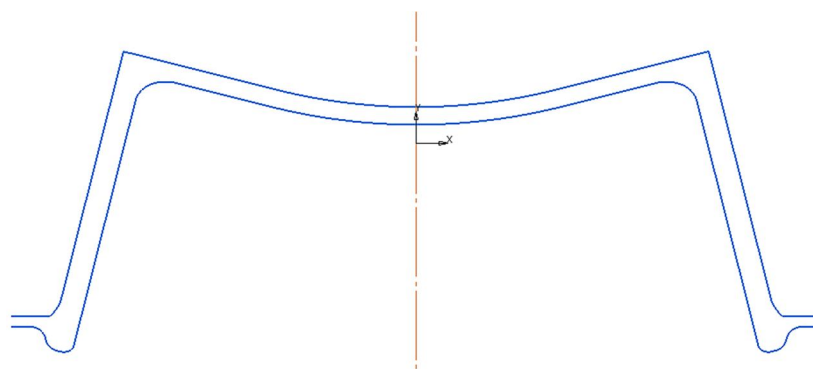


Рисунок 6 — Чертеж калибра клети № 16Г с выравниванием горизонтального элемента профиля

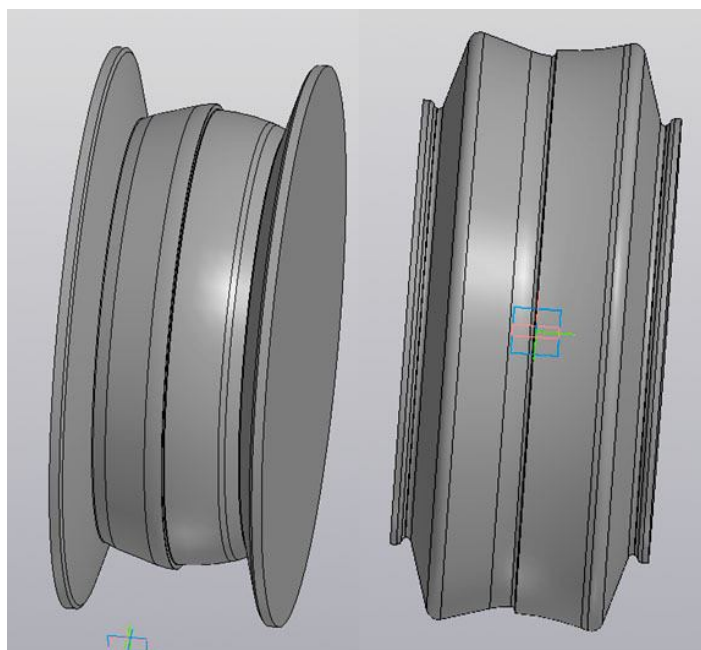


Рисунок 7 — Файл 3D-геометрии калибра верхнего (слева) и нижнего (справа) валков клетки № 13Г, выполняющей надрез

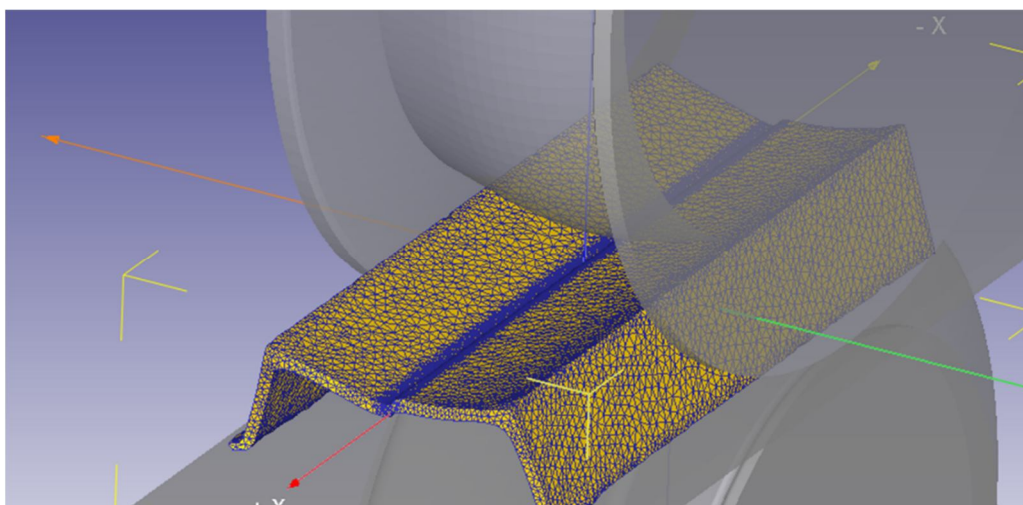


Рисунок 8 — Импорт файлов геометрии для модели клетки № 13Г, в которой производится надрез

В результате моделирования получены графики усилий, моментов и мощности на валках для клеток с нанесением надреза № 13Г (рис. 9) и выпрямляющей клетки № 16Г (рис. 10).

Также получено распределение величин критериев разрушения по сечению раската после клетки № 13Г, выполняющей надрез (рис. 11), и выравнивающей клетки № 16Г (рис. 12).

Анализ распределения критериев разрушения показывает, что после выхода раската из клетки, выполняющей надрез, максимальное значение критерия разрушения составляет 0,414. Опасная величина критерия разрушения для рядовых сталей составляет 0,6...0,7 [7]. После выхода раската из выпрямляющей клетки №16Г на торцах швеллерного раската имеет место максимальное значение критерия разрушения 0,865.

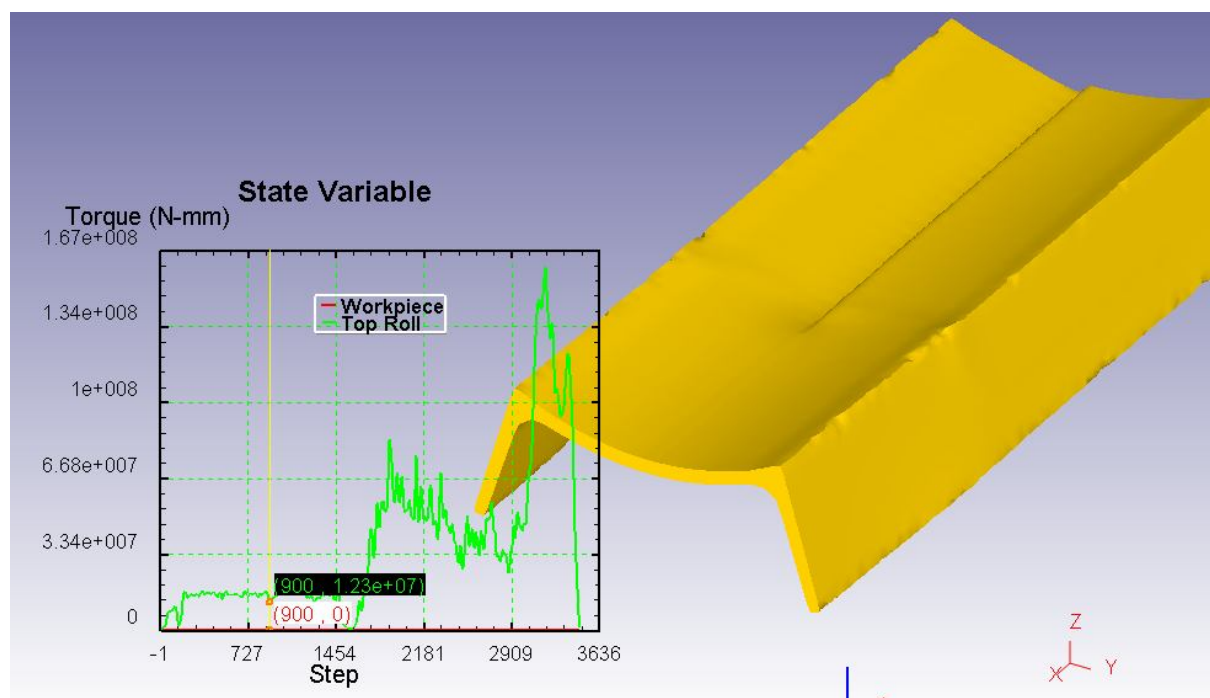


Рисунок 9 — График моментов на валках для клетки № 13Г, выполняющей надрез

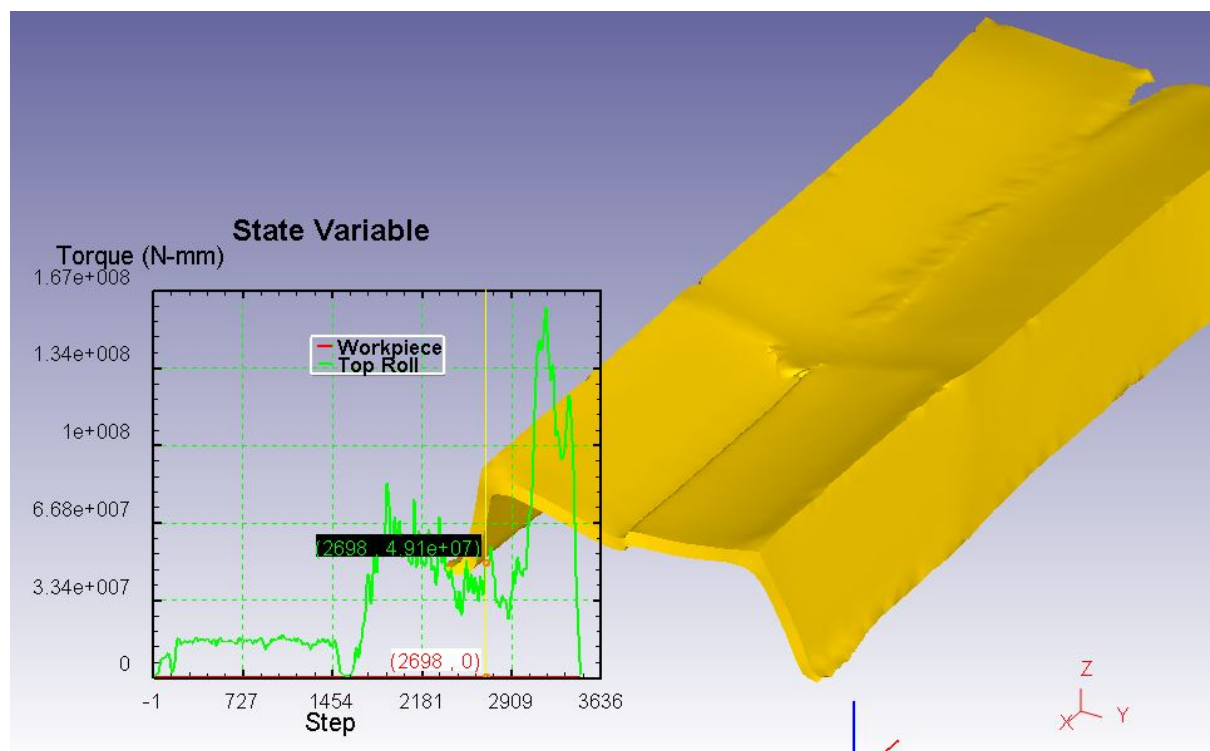


Рисунок 10 — График моментов на валках для выравнивающей клетки № 16Г

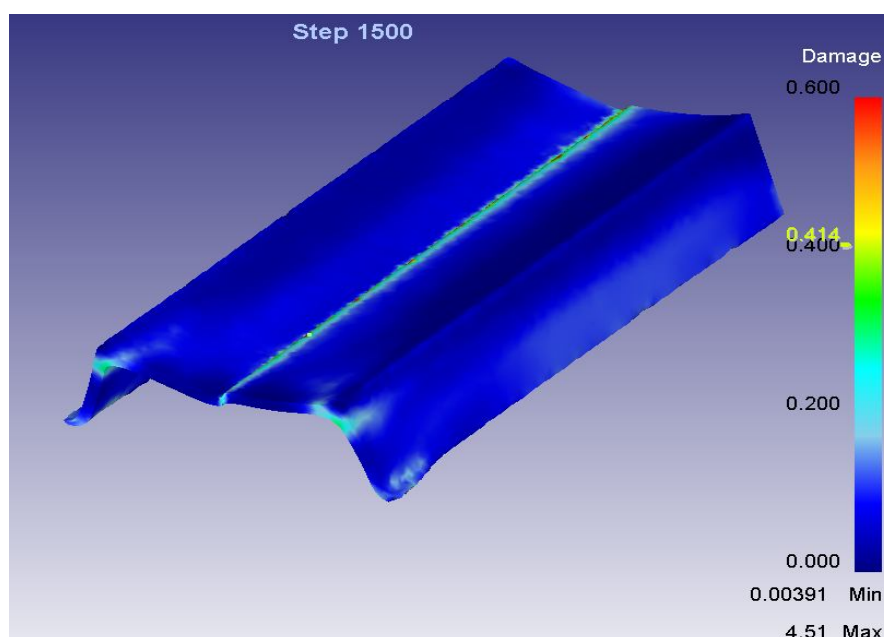


Рисунок 11 — Распределение критерия разрушения по сечению раската после клетки № 13Г, выполняющей надрез

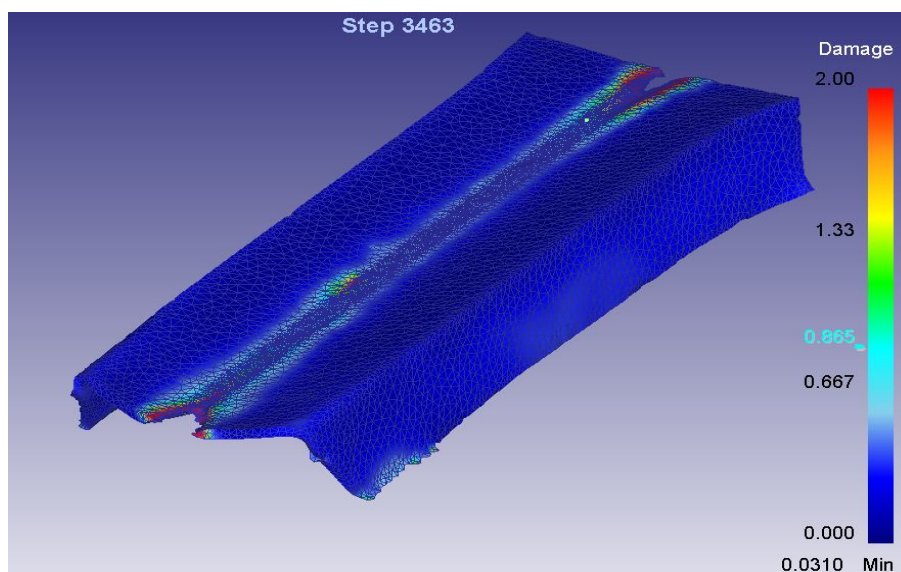


Рисунок 12 — Распределение критерия разрушения по сечению раската после выпрямляющей клетки № 16Г

Разработанная модель процесса надреза-выравнивания позволяет, изменяя технологические параметры процесса или геометрические параметры калибров, достичь оптимальных значений критерия разрушения.

Выводы:

1. В результате проведенных исследований разработан технологический процесс

производства уголка № 10 с прокаткой его в сдвоенном виде (швеллерный профиль), с подготовкой к разделению в рабочих клетях и разделением перед сортоправильной машиной в специальном устройстве.

2. Методом конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса DEFORM-2D/3D разработана

компьютерная модель процесса надреза-выравнивания швеллерного профиля в последних клетях стана «600» перед разделением на два уголка. Полученное распределение критерия разрушения показало, что после выхода из выравнивающей клетки возможно появление разрывов на переднем и заднем концах швеллера с концентрацией очагов разрушения по продольной оси раската, что значительно облегчит дальнейшее

разделение швеллера на два уголка. Изменяя технологические параметры процесса или геометрические параметры калибров можно получить оптимальные для разделения значения критерия разрушения.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку модели процесса прокатки в сдвоенном состоянии других сортов профилей (тавровые профили, полосульбовые профили и т. д.).

Список источников

1. Следнев В. П. Спаренная прокатка сортовых профилей. М. : Металлургия, 1988. 168 с.
2. Способ изготовления профильных изделий: а. с. 419283 СССР / Нефедов А. А., Мерекин Б. В., Галицкий Е. В., Мерекина И. Б., Постольник Ю. С. ; № 1795002/25-27; заявл. 29.05.1972 ; опубл. 15.03.1974, Бюл. 10. 2 с.
3. Прокатка сдвоенного полосульбового профиля с продольной разрезкой в валках чистовой клетки / Ектов И. М. [и др.] // Сталь. 1960. № 12. С. 1113–1116.
4. Способ прокатки угловых профилей на непрерывных мелкосортных станах : а. с. 174159 СССР / Нефедов А. А., Ершов В. Н. ; № 841912/22-2 ; заявл. 15.06.1963 ; опубл. 27.08.1965, Бюл. 17. 1 с.
5. Process for the production of rolled metal sections : 768072 United Kingdom / British Steel Corp ; № 1355144 ; submitted 18.02.1972 ; published 05.06.1974, 4 p.
6. ГОСТ 8509. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент. Минск : Межгосударственный стандарт, 1993. 11 с.
7. Ларионов В. П., Ковальчук В. А. Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений / отв. ред. чл.-кор. АН СССР Н. В. Черский ; АН СССР, Сиб. отд-ние, Якут. филиал ; Ин-т физ.-техн. проблем Севера. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 206 с.

© Чичкан А. А., Денищенко П. Н., Чумак Н. Ю.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Митичкиной Н. Г.,
нач. прокатной лаборатории ЦЛК ЮГМК Саушкиным А. Е.**

Статья поступила в редакцию 08.12.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чичкан Артур Алексеевич, канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Денищенко Павел Николаевич, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Чумак Николай Юрьевич, аспирант каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: nikolay31302@gmail.com

Chichkan A. A., Denishchenko P. N., *Chumak N. Yu. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: nikolay31302@gmail.com)

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR PRODUCING THE CHANNEL ROLL ANGULAR PROFILE IN THE CONDITIONS OF THE YuGMK MILL 600 BY THE LONGITUDINAL SEPARATION METHOD

The work focuses on the development a method for rolling a double angle profile of the channel type with subsequent separation before the flattener unit. To ensure subsequent separation, a strength simulation of stress concentrator (cut with subsequent alignment) was carried out through the DEFORM-2D/3D software package in the finisher stands.

Key words: separation rolling, stress concentrator, process modeling, power characteristics, fracture criterion.

References

1. Slednev V. P. Double-sided section profiles [Sparennaya prokatka sortovyh profilej]. M. : Metalurgija, 1988. 168 p. (rus)
2. Nefedov A. A., Merekin B. V., Galitskiy E. V., Merekina I. B., Postolnik Yu. S. Method for manufacturing profile products : a. s. 419283 USSR ; No. 1795002/25-27 ; submitted 29.05.1972 ; published 15.03.1974, bulletin No. 10. 2 p.
3. Ektov I. M. [et al.] Rolling of double strip bulb profile with longitudinal section in the finisher stands [Prokatka sdvoennogo polosobul'bovogo profilya s prodol'noj razrezkoj v valkah chistovoj kleti]. Stal. 1960. No. 12. Pp. 1113–1116. (rus)
4. Nefedov A. A., Ershov V. N. Method for rolling angle profiles on continuous fine-grade mills : a. s. 174159 USSR ; No. 841912/22-2 ; submitted 15.06.1963 ; published 27.08.1965, bulletin No. 17. 1 p.
5. Process for the production of rolled metal sections : 768072 United Kingdom / British Steel Corp. No. 1355144 ; submitted 18.02.1972 ; published 05.06.1974. 4 p.
6. GOST 8509. Hot-rolled steel equilateral angles [GOST 8509. Ugolki stal'nye goryachekatanye ravnopolochnyye]. Sortiment. Minsk : Mezghosudarstvennyj standart, 1993. 11 p. (rus)
7. Larinov V. P., Kovalchuk V. A. Cold resistance and wear of machine parts and welded joints [Hladostojkost' i iznos detalej mashin i svarynh soedinenij]. Editor-in-chief. Associate member of the Academy of Sciences of the U.S.S.R. Cherskiy N. V. Siberian Branch. Yakutsk filial branch. Institute of physical and technical problems of the North. Novosibirsk : Science. Siberian Branch, 1976. 206 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chichkan Artur Alekseevich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Denishchenko Pavel Nikolayevich, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

Chumak Nikolay Yurievich, Postgraduate student of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: nikolay31302@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING

УДК 669.18

^{1,*}Еротько С. П., ¹Ошовская Е. В., ²Денисова Н. А., ²Петров П. А.¹Донецкий национальный технический университет,²Донбасский государственный технический университет

*E-mail: ersp52@mail.ru

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ

Отображены конструктивные особенности системы подачи газопорошковых смесей в ванну кислородного конвертера, предназначенного для переработки некачественной шихты и металлосодержащих отходов в условиях микрозавода. Описана методика проведения модельных исследований разработанной системы, результаты которых позволили получить исходную информацию для проектирования промышленного образца плавильного агрегата с корпусом, вращающимся вокруг наклонной продольной оси и позволяющим получать металл из жидкого чугуна и металлического лома с повышенным содержанием вредных примесей.

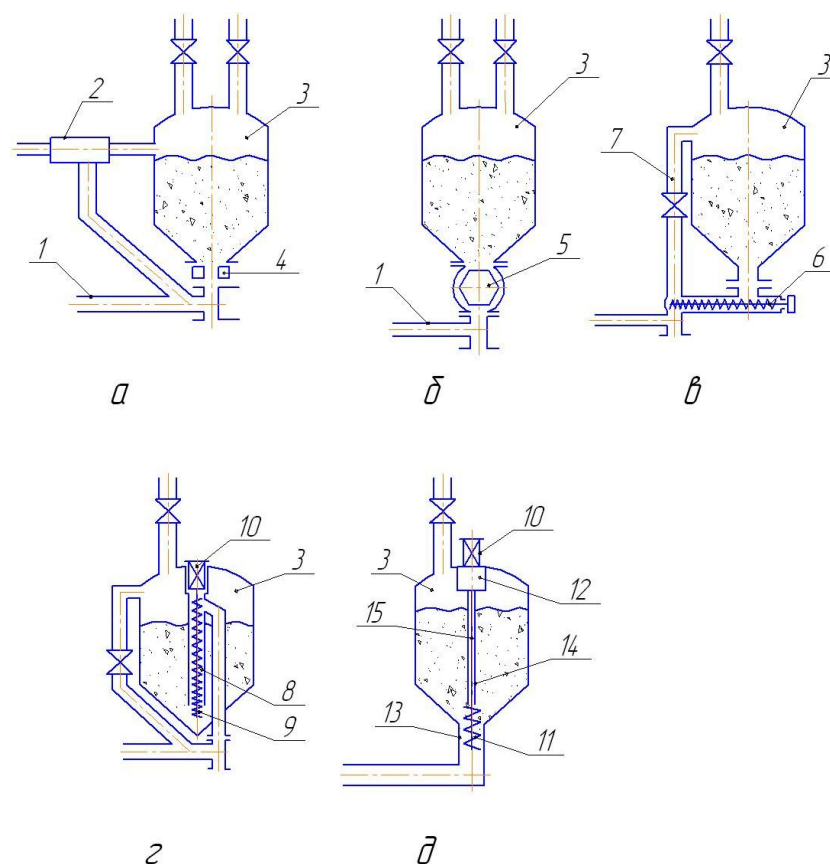
Ключевые слова: кислородный конвертер, фурма, продувка, газопорошковая смесь, бункер, шнековый питатель, физическое моделирование.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В последние годы за рубежом активизировались работы, связанные с запуском мини- и микрозаводов по переработке промышленных и бытовых металлосодержащих отходов с использованием малотоннажных электродуговых печей и кислородных конвертеров с корпусом, вращающимся относительно наклонной продольной оси [1, 2]. Второй из указанных сталеплавильных агрегатов позволяет перерабатывать некачественную шихту с повышенным содержанием таких вредных примесей, как сера и фосфор [3, 4]. Это достигается за счет того, что для их удаления из расплава в шлак во время ведения плавки наряду с флюсами в кусковом виде используют вдувание в струе кислорода мелкодисперсных реагентов с целью интенсификации реакций, протекающих в жидкой ванне. При этом целесообразно в расплав осуществлять одновременную подачу в составе газопорошковых смесей нескольких видов флюсов (известь, металлическая окалина, плавикový шпат). Эффективность использования данных реагентов определяется степенью равномерности их ввода в струе кислорода через верхнюю во-

дохлаждаемую фурму. Для обеспечения вдувания с регулируемым расходом двухкомпонентной газопорошковой смеси в рабочее пространство кислородного конвертера требуется оборудование его продувочной системы специальными питателями, подающими из разных бункеров мелкодисперсные материалы в смесительную камеру, из которой образующаяся смесь по гибкому трубопроводу транспортируется в струе кислорода к фурме, совершающей внутри конвертера качение в заданном секторе. В результате ранее выполненного сопоставительного анализа конструктивного совершенства известных устройств, предназначенных для регулируемой выдачи из бункера сыпучих материалов и схематично показанных на рисунке 1, была установлена невозможность сохранения требуемого расхода одного компонента порошковой смеси во время подачи в смесительную камеру другого компонента при комплексном использовании двух пневматических дозаторов. Это обусловлено повышением давления газа в зоне смешения двух мелкодисперсных материалов, что, в свою очередь, влечет за собой уменьшение производительности каждого из двух пневматических

дозаторов [5, 6]. Таким образом, при комплексном использовании такого вида питателей затруднительно в полной мере реализовать заданную технологию одновременного регулируемого вдувания нескольких порошкообразных реагентов в жидкую металлическую ванну через одну фурму [7].

Целью работы является поиск технического решения для создания системы верхней продувки ванны кислородного конвертера двухкомпонентными порошкообразными смесями, которая обеспечивает устойчивую и регулируемую подачу ингредиентов в ванну плавильного агрегата.



1 — транспортирующий трубопровод; 2 — регулятор давления; 3 — бункер; 4 — калибрующая вставка; 5 — барабан; 6 — горизонтальный шнек; 7 — выравнивающий трубопровод; 8 — вертикальная труба; 9 — вертикальный шнек; 10 — электродвигатель; 11 — вертикальный шнек; 12 — редуктор; 13 — подающая труба; 14 — вертикальная трубка; 15 — вертикальный вал

Рисунок 1 — Дозаторы для подачи порошкообразных и гранулированных реагентов (а — пневматический; б — барабанный; в, г, д — шнековые)

Изложение материала и результаты исследований. Для решения поставленной задачи авторами был предложен вариант использования продувочной системы, реализующей пневмомеханический способ подачи реагентов в полость кислородного конвертера в струе кислорода через фурму, охлаждаемую водой [3, 4]. Конструктивная схема данной системы показана на ри-

сунке 2. Она содержит два герметичных бункера 13, закрепленных на четырех колоннах над наклонными рельсами и снабженных размещенными внутри них питателями, приводимыми в действие моторами-редукторами 14 и 15. К нижней части каждого из бункеров примыкает камера 12 связанная со смесителем 11, который соединен посредством гибкого трубопрово-

да 10 со штуцером кислородной фурмы 1. При поступлении газообразного кислорода в полость смесителя 11 частицы компонентов, подаваемые шнековыми питателями, образуют газопорошковую смесь, которая транспортируется к соплу фурмы. Сама фурма верхней своей частью закреплена на поворотной опоре в обойме 8 и с помощью кривошипно-шатунного механизма 6 может совершать качания относительно каретки 5 в пределах продолговатого отверстия колпака 2, жестко связанного с кареткой и снабженного патрубком для подсоединения газоотводящего тракта. В свою очередь, обойма 8 вместе с удерживаемой ею фурмой 1 имеет возможность поворота относительно платформы в вер-

тикальной плоскости на определенный угол с помощью кулачка 7, установленного на выходном валу мотора-редуктора 9, закрепленного на поворотной опоре. Каретка 5 снабжена ходовыми колесами 4, размещенными на двух наклонных направляющих 3, по которым может совершать возвратно-поступательное перемещение с помощью ходового винта 17, вращаемого в нужном направлении реверсивным мотором-редуктором 16.

Для проверки правильности принятого технического решения спроектировали и изготовили в масштабе 1:5 действующую натурную модель исследуемой продувочной системы (фото на рис. 3), с использованием которой провели лабораторный эксперимент.

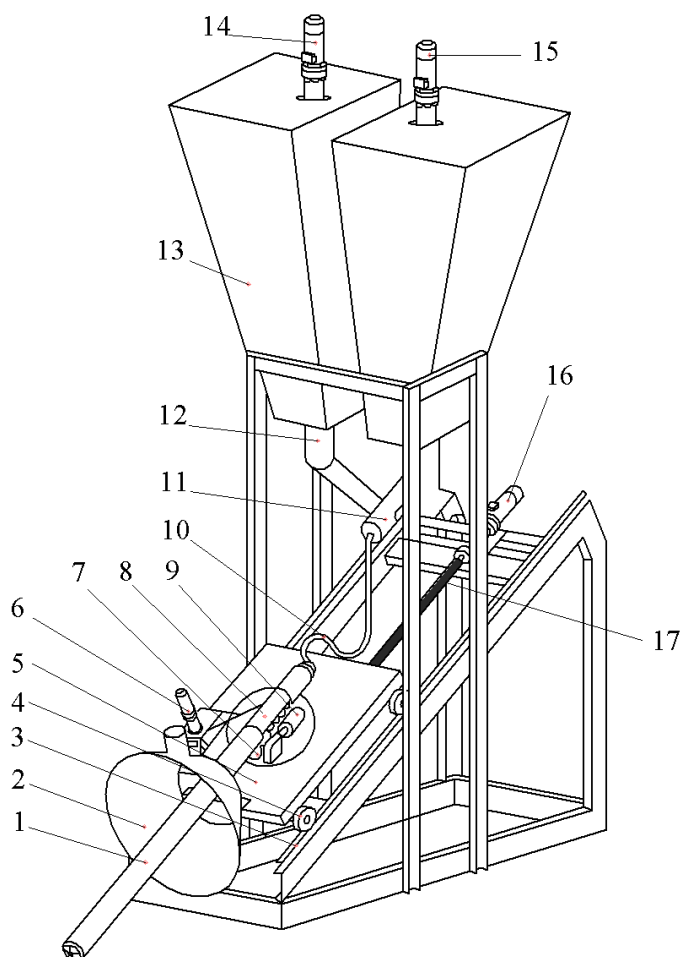
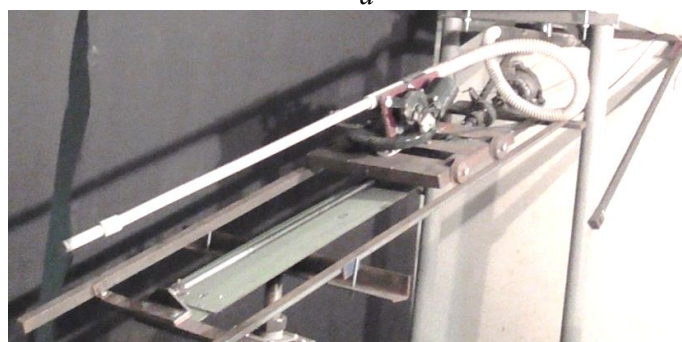


Рисунок 2 — Предложенная система верхней продувки ванны кислородного конвертера двухкомпонентной порошкообразной смесью

МАШИНОСТРОЕНИЕ



а



б

Рисунок 3 — Фрагменты основных элементов действующей натурной модели системы верхней продувки кислородного мини-конвертера: а — бункеры мелкодисперсных материалов; б — фурма и исполнительные механизмы, расположенные на наклонных направляющих

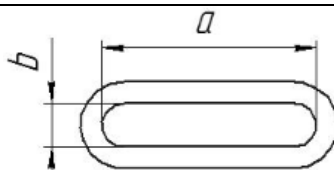
В ходе модельных исследований получили информацию о влиянии на процесс взаимодействия частиц материала с жидкой ванной расстояния между срезом сопла фурмы и свободной поверхностью жидкости, угла атаки, истекающей из сопла газопорошковой струи, плотности и долевого содержания составляющих вдуваемой смеси, а также её массового расхода.

В соответствии с рекомендациями работы [8], при моделировании обеспечили соотношение плотностей имитаторов флюсов и жидкой стали, близкое по значению к производственным условиям. Как известно, для десульфурации используют кальцинированную соду (Na_2CO_3), а для дефосфорации — флюс на основе извести и оксида железа (50 % CaO , 50 % FeO). Отношение плотностей извести и окалины к плотности жидкой стали, как известно, составляет 0,3 и 1,1. Поэтому в условиях лабораторного эксперимента при исполь-

зовании воды в качестве имитатора жидкого металла для поддержания в отмеченных пределах отношения плотностей имитаторов компонентов флюсовой смеси необходимы материалы с плотностью 0,3 и 1,1 г/см³ соответственно. Также эти материалы должны иметь цвет, который позволял бы получать контрастную картину протекающих процессов, фиксируемую при видеосъёмке. Отмеченным условиям в наибольшей мере отвечали измельченные частицы древесного угля и полиэтилена плотностью 0,25 и 1,05 г/см³ соответственно. Размер частиц находился в пределах 0,1–1,0 мм. В качестве имитатора шлакового расплава использовали минеральное масло, имеющее плотность 0,8 г/см³. Во время моделирования работы продувочной системы фурма находилась в стационарном состоянии. Форма и размеры ее сопла приведены в таблице 1.

Таблица 1

Форма и размеры сопла, использовавшегося при моделировании процесса верхней продувки ванны конвертера

Форма сечения сопла модели фурмы	a , мм	b , мм	Площадь проходного сечения, мм ²
	16	2	31,1

В ходе проводившихся опытов осуществляли подачу в транспортирующий трубопровод сжатого воздуха при неизменных динамических параметрах: давлении 0,11 МПа и расходе 30 л/мин. В каждом последующем опыте при заданной скорости истечения газопорошковой струи дискретно изменяли процентное содержание ингредиентов, входящих в состав смеси, имитирующей флюсы. В частности, были смоделированы варианты вдувания одной извести и смесей, включавших в разных пропорциях известь и окалину. Указанные условия проведения экспериментов обеспечивали путем загрузки в бункеры модели отдельно имитаторов извести и окалины и поддержанием их расхода в заданных соотношениях за счет регулирования производительности каждого из двух питателей изменением частоты вращения вертикальных шнеков.

Просмотр снятых видеозаписей в режиме «стоп-кадр» (рис. 4) позволил установить следующие особенности газогидродинамических процессов, протекающих в полости модели сталеплавильного агрегата при различном сочетании учетных параметров. В случае моделирования процесса вдувания в полость конвертера мелкодисперсной извести имитировавшие её частицы древесного угля, плотность которых была в несколько раз меньше плотности воды, после удара о её поверхность отражались от неё под различным углом и продолжали движение в направлении донной части модели плавильного агрегата (рис. 4, а).

Если в состав газопорошковой смеси наряду с имитатором извести (измельченным древесным углем) входили частицы полиэтилена (имитатора окалины) с плотностью, близкой к плотности воды, моделировавшей жидкий металл, некоторая часть легковесного материала увлекалась частицами полиэтилена на небольшую глубину относительно границы раздела «вода — масло». Так, при наличии в смеси 25 % частиц полиэтилена и 75 % частиц древесного угля заглубливание последних в воду составляло порядка 5–8 мм (рис. 4, б). С увеличением доли частиц полиэтилена до 50 % в смеси, имитировавшей флюс, вдуваемый с целью дефосфорации выплавляемого металла, глубина проникновения частиц древесного угля в толщу воды возрастала. Например, для смеси, включавшей в равных долях частицы полиэтилена и древесного угля, глубина проникновения имитатора извести в воду достигала 20–25 мм (рис. 4, в), т. е. увеличивалась в 3 раза, что на практике будет способствовать увеличению поверхности контакта вдуваемого флюса с расплавом и ускорению протекания соответствующих химических процессов, способствующих удалению из него нежелательных примесей.

Таким образом, на эффективность использования порошкообразной извести, вдуваемой в струе кислорода через верхнюю фурму в полость кислородного конвертера с вращающимся корпусом, можно дополнительно влиять путем выбора рационального соотношения в составе вдуваемой смеси порошкообразных реагентов, имеющих большую насыпную плотность.

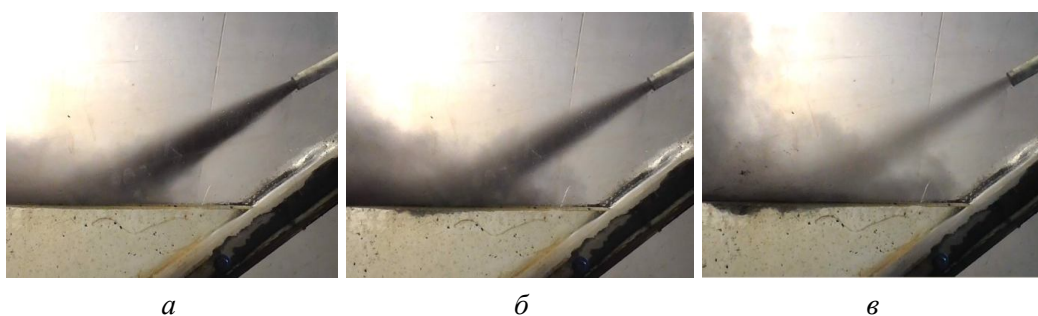


Рисунок 4 — Характер взаимодействия с поверхностью жидкой ванны газопорошковой струи при различном соотношении компонентов вдуваемой смеси: а) измельченный древесный уголь 100 %; б) измельченный древесный уголь 80 % и гранулы полиэтилена 20 %; в) измельченный древесный уголь 50 % и гранулы полиэтилена 50 %

Выводы и направления дальнейших исследований. Результаты, полученные в ходе модельных исследований, использованы при проектировании опытно-промышленного образца продувочной системы кислородного мини-конвертера с вращающимся корпусом, который предназначается для реализации технологии переработки некачественной шихты, а также промышленных и бытовых металлосодержащих отходов в условиях мини- и микроразводов [9]. Запуск и эффективная работа

таких предприятий позволят улучшить экологическую обстановку в местах расположения отвалов и свалок за счет постепенного уменьшения объемов накопившихся там побочных продуктов промышленного производства. Инвестиционные вложения, связанные с введением в строй заводов такого масштаба, составляют примерно 300–400 долларов на тонну производимой в год стали, в связи с чем срок окупаемости инвестиционных затрат не превысит 3-х лет [10].

Список источников

1. Смирнов А. Н., Сафонов В. М., Дорохова Л. В. *Металлургические мини-заводы*. Донецк : ООО «Норд-Пресс», 2005. 465 с.
2. Овчинников А. М. *Модернизация оборудования и реконструкция заводов чёрной металлургии за рубежом // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация», 2016. № 2. С. 96–100.*
3. Еронько С. П., Климович Н. А. *Перспективы использования и проблематика создания мини-агрегата для переработки некачественной шихты и металлосодержащих отходов // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация», 2016. № 5. С. 26–31.*
4. *Кислородный конвертер для переработки чугуна и металлического лома с повышенным содержанием вредных примесей : пат. 2623934 Рос. Федерация / С. М. Горбатюк, С. П. Еронько, Н. А. Климович ; № 2016111484 ; заявл. 29.03.2016 ; опубл. 29.06.2017, Бюл. № 19.*
5. Большаков В. И., Седуш В. С., Лифенко Н. Т. *Увеличение точности дозирования порошковых и пылевидных материалов пневмотранспортными установками // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 1. С. 85–87.*
6. Лифенко Н. Т., Седуш В. С., Сидоренко Г. Н. *Питатели для систем пневматической подачи порошковых и зернистых материалов в металлургические расплавы // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 10. С. 15–153.*
7. Кузнецов Ю. М. *Одновременно регулируемая инжекция нескольких видов порошков в жидкий металл // Сталь. 2004. № 1. С. 17–22.*
8. *Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства : учебное пособие / С. П. Еронько [и др.]. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 324 с.*
9. Еронько С. П., Ошовская Е. В., Стародубцев Б. И. *Совершенствование системы вдувания газопорошковых смесей в ванну конвертера с вращающимся корпусом // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация». 2017. № 7. С. 75–81.*

10. Концепция построения и развития микро-заводов по переработке некачественной шихты и металлосодержащих отходов / С. П. Еронько [и др.] // Черная металлургия : бюл. ин-та «Черметинформация». 2019. Т. 75. № 9. С. 1029–1036.

© Еронько С. П., Ошовская Е. В.

© Денисова Н. А., Петров П. А.

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

Статья поступила в редакцию 27.11.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Ошовская Елена Владимировна, канд. техн. наук, доцент каф. механического оборудования заводов черной металлургии им. проф. В. Я. Седуша
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия

Денисова Наталья Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. машин металлургического комплекса
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

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

***Yeronko S. P., Oshovskaya Ye. V.** (Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia, *e-mail: ersp52@mail.ru), **Denisova N. A., Petrov P. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia)

DEVELOPMENT AND MODEL TESTING OF POWDER MIXTURES ON LIQUID METAL SURFACES IN AN OXYGEN CONVERTER

The system's design features for supplying gas powder mixtures to the oxygen converter bath, designed for processing low-quality charge and metal-containing waste in the conditions of a micro-plant, are shown. The method for conducting model research for the developed system is described, the results of which allowed to obtain initial information for designing the industrial sample of a melting unit with a body, rotating around the inclined longitudinal axis and allowing the production of metal from liquid cast iron and metal scrap with an increased content of harmful impurities.

Key words: basic oxygen converter, tuyere, blow, gas powder mixture, bunker, auger feeder, physical modelling.

References

1. Smirnov A. N., Safonov V. M., Dorohova L. V. Metallurgical mini-plants [Metallurgicheskie mini-zavody]. Donetsk : OOO "NORD-PRESS", 2005. 465 p. (rus)
2. Ovchinnikov A. M. Modernization of equipment and reconstruction of steel plants abroad [Modernizaciya oborudovaniya i rekonstrukciya zavodov chyornoj metallurgii za rubezhom]. Ferrous Metallurgy. Bulletin of the Institute "Chermetinformaciya". 2016. No. 2. Pp. 96–100. (rus)

3. Yeronko S. P., Klimovich N. A. Advantages and disadvantages of creating a mini-unit to processing the low-quality charge and metal-containing wastes [Perspektivy ispol'zovaniya i problematika sozdaniya mini-agregata dlya pererabotki nekachestvennoj shihty i metallsoderzhashchih othodov]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of the Institute "Chermetinformaciya"*. 2016. No. 5. Pp. 26–31. (rus)

4. Gorbatyuk S. M., Yeronko S. P., Klimovich N. A. Oxygen converter for iron and metal scrap processing with high impurity content. Patent 2623934 RF. No. 2016111484. Date of filing 29.03.2016. Published 29.06.2017. Bulletin No. 12.

5. Bol'shakov V. I., Sedush V. S., Lifenko N. T. Increase of dosing accuracy of powder and dust materials by pneumatic transport installations [Uvelichenie tochnosti dozirovaniya poroshkovykh i pylevidnykh materialov pnevмотransпортными установками]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2002. No. 1. Pp. 85–87. (rus)

6. Lifenko N. T., Sedush V. S., Sidorenko G. N. Feeders for pneumatic powder and grit feed systems into metallurgical melts [Pitateli dlya sistem pnevmатической подачи poroshkovykh i zernistykh materialov v metallurgicheskie rasplavy]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2002. No. 10. Pp. 15–153. (rus)

7. Kuznecov Yu. M. Simultaneously adjustable injection of several types of powders into liquid metal [Odnovremенно регулируемая инъекция нескольких видов порошков в жидкий металл]. *Stal*. 2004. No. 1. Pp. 17–22. (rus)

8. Yeronko S. P. [et al.] Physical modeling of technical steel production systems: study letter [Fizicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem staleplavil'nogo proizvodstva: uchebnoe posobie]. Moscow ; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2021. 324 p. (rus)

9. Yeronko S. P., Oshovskaya E. V., Starodubcev B. I. Improvement of gas powder mixtures blowing system into the converter bath with rotating body [Sovershenstvovanie sistemy vдуvaniya gazoporoshkovykh smesey v vannu konvertera s vrashchayushchimsya korpusom]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of the Institute "Chermetinformaciya"*. 2017. No. 7. Pp. 75–81. (rus)

10. Yeronko S. P. [et al.] Concept of construction and development of micro-plants for processing the low-quality charge and metal-containing wastes [Konceptiya postroeniya i razvitiya mikro-zavodov po pererabotke nekachestvennoj shihty i metallsoderzhashchih othodov]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of the Institute "Chermetinformaciya"*. 2019. Vol. 75. No. 9. Pp. 1029–1036. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Oshovskaya Yelena Vladimirovna, PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after prof. Sedush V. Ya.
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia

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

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

УДК 621.658.512 (035)

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

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТАДИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 1: ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

Показана взаимосвязь процессов расширения современных конструкционных материалов с улучшенными эксплуатационными и другими свойствами с развитием методов их обработки и получения неразъемных соединений, прежде всего сварных. Представлены рекомендации по выбору критериев для комплексного подбора основных материалов конструкций. Описаны ограничения применения традиционных способов сварки плавлением для создания высокотехнологичных конструкций и перспективность более широкого внедрения сварки трением с перемешиванием. Кратко рассмотрены и проанализированы особенности формирования сварных соединений при сварке трением с перемешиванием (СТП) с учетом протекающих тепловых, металлургических, термомеханических процессов, взаимодействия материалов с их схватыванием, а также фазовых и структурных превращений в металлах. Рассмотрены представления о технологической свариваемости при СТП и выборе рациональных режимов сварки. Рассмотрен алгоритм выбора материала конструкции при сварке трением с перемешиванием.

Ключевые слова: *конструкционные материалы, неразъемные соединения, сварной шов, способы сварки плавлением, технологическая свариваемость, технологичность конструкций.*

Введение. Инновационное развитие промышленности сопровождается непрерывно растущей потребностью в более высокопрочных, легких, коррозионноустойчивых и других эффективных материалах с улучшенными физико-химическими и эксплуатационными свойствами. Создание и освоение производства и применения новых конструкционных материалов является одним из важнейших направлений науки и техники. Осваивается производство и расширяется практическое применение металлических сплавов (титана, алюминия, магния, меди, никеля, высокопрочных и нержавеющей сталей и др.), полимерных и композиционных материалов с улучшенными и более высокими эксплуатационными свойствами. Однако при проектировании машиностроительных и иных конструкций проблематичными являются вопросы рационального выбора конструкционных материалов и технологических способов их обработки. Поэтому активно ведутся работы по созданию алгоритмов и компьютерных методик выбора материа-

лов и технологических процессов производства деталей, ориентированных на комплексное проектирование изделий [1]. При проектировании выявляются и конкретизируются конструкторско-технологические, функциональные и технико-экономические требования, рекомендации заказчиков и потребителей изделий. Конструкторы и технологи проводят поиск более эффективных конструкционных материалов и технологических процессов их обработки для повышения конкурентоспособности изделий. Этим обусловлено расширение работ по созданию методик интегрированного подхода к выбору материалов и соответствующих технологий. При инновационном подходе к выбору материалов и технологий с учетом жизненного цикла изделий в организациях возрастает роль накопления и управления знаниями.

Выбор конструкционных материалов должен проводиться с учетом возможности создания конструкций, обладающих требуемыми эксплуатационными свойствами и параметрами с надлежащими количествен-

ными значениями, к которым, например, могут быть отнесены: прочность, плотность, удельная прочность, усталостная прочность, обрабатываемость, теплоустойчивость, трещиностойкость, теплопроводность, износостойкость и многие другие [2]. Критериями для выбора материалов являются свойства, наиболее полно отражающие цели и задачи проектирования конструкции. Например, достижимую прочность конструкции при определенной массе отражает удельная прочность, являющаяся отношением предела прочности материала к его плотности.

Задача рационального выбора материала конструктором весьма трудна, поскольку к настоящему времени разработано и производится громадное их разнообразие. Каждый из этих материалов характеризуется рядом свойств: физических, химических, технологических и иных. Выбор материала для каждого конкретного применения требует поиска и анализа больших массивов данных. Решению этих проблем способствует разработка алгоритмов выбора материалов в процессе проектирования с использованием методов искусственного интеллекта, классификации данных и многокритериальных моделей принятия решений. Основная функция такого алгоритма заключается в ориентации результатов поиска по базам данных таким образом, чтобы принятие решения о выборе материала было максимально простым [1, 2].

Конструкции изделий представляют собой сложные технические системы (ТС), состоящие из большого количества отдельных подсистем и элементов. Многие элементы ТС изготавливают из отдельных деталей и заготовок с неразъемными соединениями между ними. При изготовлении высокотехнологичных изделий во многих отраслях машиностроения широко используются различные способы сварки плавлением и, прежде всего, высококонцентрированными источниками нагрева (плазменная, лазерная электроннолучевая, трением и другие способы сварки). Однако

сварке плавлением присущ ряд недостатков: возникновение высоких остаточных напряжений, приводящих к деформации изделий; пониженная прочность сварных швов (на 10–20 % и более ниже прочности основного металла); термическое разупрочнение свариваемых металлов, снижающее конструктивную прочность изделий; образование дефектов в виде трещин в сварных соединениях ряда высокопрочных термоупрочняемых сплавов; высокие трудозатраты на подготовку сварочных кромок перед сваркой и послесварочную обработку и между проходами; для большого ряда высокопрочных сплавов отсутствует возможность получения качественных сварных соединений и др. Все эти проблемы увеличивают трудоемкость и сроки разработки и подготовки производства изделий, затрудняют применение новых эффективных материалов. Поэтому одним из перспективных направлений технологии изготовления новых видов высокотехнологичных изделий машиностроения является изыскание и разработка прогрессивных способов сварки, способных устранить или уменьшить негативные особенности существующих технологий. К таким способам относится сварка трением с перемешиванием (СТП), запатентованная в 1991 г., интенсивно развиваемая во всех странах с высоким промышленным потенциалом (США, Великобритания, Китай, Индия, Россия и др.).

Применение сварки трением с перемешиванием существенно расширило технологические возможности получения сварных соединений с улучшенными свойствами, в том числе материалов, трудно поддающихся сварке традиционными способами. Это расширяет возможности создания высокотехнологичных сварных конструкций из более эффективных конструкционных материалов. Однако в настоящее время отсутствуют рекомендации по рациональному выбору основных материалов конструкций, получаемых сваркой трением с перемешиванием.

Цель данной статьи заключается в анализе особенностей, преимуществ и недостатков сварки трением с перемешиванием и разработке на их основе рекомендаций по выбору основных материалов проектируемых сварных изделий с учетом их производственной технологичности.

Особенности и преимущества сварки трением с перемешиванием. СТП осуществляется с помощью специального вращающегося фрикционного инструмента, перемещающегося в направлении сварки. Рабочая часть фрикционного инструмента конструктивно состоит из заплечика и наконечника (пина или рабочего стержня), имеющих специальный профиль. Процесс СТП заключается во внедрении наконечника вращающегося инструмента в стык свариваемых деталей до контакта с ними и прижима заплечика и его движения вдоль линии стыка и выхода из стыка заготовок в конце сварного шва [3, 4]. Одновременно с этим заготовки прижимаются к подложке вращающимся заплечиком с необходимой осевой силой, которая в зависимости от толщины заготовок может достигать 100 кН. Трение, возникающее в контакте «заплечик — лицевая сторона деталей и наконечник — материал деталей», приводит к локальному разогреву материала деталей в области сварки и его переходу в высокопластичное состояние. При этом температура материала в области сварки не превышает температуру плавления металла [3–7]. За движущимся фрикционным инструментом образуется сварной шов. При окончании процесса сварки фрикционный инструмент извлекается из деталей. После извлечения инструмента в конце сварного шва образуется выходное отверстие — кратер.

Выполнение процессов сварки трением с перемешиванием и получение при этом сварных конструкций связано с рядом особенностей и отличий от традиционных способов сварки. Рассмотрим их в соответствии с основами теории и практики сварочных процессов.

Источники энергии. СТП относится к механическим процессам, протекающим без предварительного введения в контакт непосредственно свариваемых материалов за счет трения и их пластической деформации.

Тепловые процессы. СТП выполняется с незначительным тепловложением в свариваемые заготовки [6–8]. Теплота генерируется как в тонкой цилиндрической области, примыкающей непосредственно к пину относительно малого диаметра, так и на плоской поверхности заготовок в области контакта с заплечиком относительно большим диаметром. Таким образом, источник тепла распределяется в объеме материала, окружающем пин (зона перемешивания). Примерно около 30 % теплоты выделяется около пина, а 70 % — у рабочей поверхности заплечика. Подводимая к вращающемуся инструменту механическая энергия преобразуется главным образом в тепловую. При стационарных режимах сварки генерируемая теплота практически не зависит от времени, если не учитывать уменьшение вязкости материала при повышении температуры заготовок в области тепловыделения. При нестационарных режимах тепловая мощность является функцией времени, определяемой в основном технологическим режимом. Часть выделяющейся теплоты отводится от заготовок непосредственно через инструмент. Соответствующая доля зависит как от материала свариваемых деталей, так и самого инструмента. Обычно доля отводимой тепловой мощности через инструмент составляет от 15 до 25 % от общей выделяемой мощности [8]. Максимум температуры находится на заднем крае заплечика по отношению к направлению движения инструмента. Кроме того, разница температур на задней и передней кромках заплечика составляет 100 °С, изменение температуры с 450 до 200 °С продолжается за инструментом на расстоянии двух диаметров заплечика.

Металлургические процессы при СТП связаны с такими особенностями, как [4, 6–10]: протекание процесса соединения ма-

териалов в твердой фазе; отсутствие недостатков, связанных с расплавлением и испарением свариваемых металлов; отсутствие необходимости в присадочных материалах и защитных газах; отсутствие сварочной ванны и необходимости ее защиты; отсутствие «выгорания» легирующих элементов; очевидно меньший риск образования трещин и пор в сварном шве; отсутствие дефектов, характерных для сварки плавлением, вызванных затвердеванием металлов (дефекты в виде дендритной структуры, усадочных раковин, непроваров, шлаковых включений, скоплений газовых пор и др.); формирование мелкозернистой рекристаллизованной структуры сварного шва.

Термодеформационные процессы протекают с формированием низких остаточных напряжений, деформации и усадки даже в протяженных сварных швах; практически полное отсутствие коробления и термической деформации сварного изделия во многих случаях исключает необходимость их механической правки [3, 4, 6, 9].

Образование сварных соединений. Процесс СТП является своеобразным механизмом соединения материалов в твердой фазе при снижении разупрочнения металла в зоне термического влияния и уменьшении ее протяженности [9–13]. Он сопровождается кругообразным течением материала, обусловленным геометрией вращающегося инструмента. Массоперенос металла в зоне шва осуществляется подобно тому, как это происходит при экструзии, когда цилиндрический слой материала одной из пластин, смещаясь под действием сил трения, вытесняет слой материала другой пластины. В результате образуется макроструктура, подобная «луковым кольцам». Особенности пластического течения металла в процессе СТП создают предпосылки для образования дефектов строения сварного шва.

Фазовые и структурные превращения в металлах. Температура в зоне сварки и ее распределение по металлу существенным

образом влияют на скоростные и технологические характеристики, а также на процессы массопереноса и фазовые превращения [3, 6–9, 14]. В соединении, полученном СТП, выделяют четыре характерные зоны влияния процесса сварки: 1. Зона интенсивной деформации (зона перемешивания) или «динамически рекристаллизованная область»; 2. Зона термомеханического воздействия (ЗТМВ), где материал испытывает меньшую деформацию и более низкую температуру; 3. Зона термического влияния (ЗТВ) — область, достаточно близкая к сварному шву для термического воздействия, чтобы модифицировать микроструктуру и/или свойства, где видимых следов пластической деформации не обнаруживается; 4. Основной (исходный) металл окружает зону термического влияния, в которой не деформируется и не подвергается воздействию тепла для изменений в микроструктуре или свойствах, и удален от сварного шва. В ЗТМВ и «ядре» шва, помимо нагрева и интенсивной пластической деформации, наблюдаются процессы динамической рекристаллизации, особенно это касается «ядра» шва, представляющего собой динамически рекристаллизованный материал. Плотность дислокаций здесь ниже, чем в зоне термомеханического влияния, зерна близки к равноосным, а их размер значительно меньше, чем в исходном материале.

Технологическая свариваемость материалов при СТП характеризуется такими возможностями, как [6, 7, 9, 15, 16]: получение высокопрочных сварных швов однородных или разнородных металлов и сплавов, включая алюминий, титан, магний, медь, цинк, никель и их сплавы, сталь, в том числе стыковых соединений переменной толщины и др.; высокие прочностные свойства сварного шва (до 100 % прочности основных материалов); сквозное сваривание, обеспечивающее высокую прочность даже в тонких (критических) сечениях; образование соединений между сплавами, которые не могут быть получены при сварке плавлением из-за чувствительности к обра-

зованию горячих трещин, пор и других дефектов; широкая номенклатура свариваемых материалов, трудно свариваемых традиционными способами; улучшение микроструктуры и повышение усталостной прочности сварных соединений по сравнению с традиционными способами; получение сварных нахлестанных швов у заготовок, изготавливаемых с помощью различных технологий (литье, прессование и др.), сварочный шов имеет радиальную структуру. В связи с этим при определенных видах деформации или при работе детали в агрессивной среде может накапливаться усталость сварного шва.

Характерными дефектами, появление которых обусловлено самим механизмом СТП, являются: несплошности материала, связанные с его неполным или недостаточным механическим перемешиванием в «ядре» и в ЗТМВ. Такие дефекты проявляются в виде несплошностей, пустот, внутренних границ раздела с концентрацией на них оксидов. Они могут иметь различный размер и располагаться как в объеме материала, так и выходить на поверхность. Дефекты такого типа снижают длительную прочность, усталостную и коррозионную стойкость соединения. Местом зарождения дефектов другого типа — микротрещин — являются границы между основным материалом и зоной термического влияния, а также между микроструктурными зонами внутри шва. Микротрещины могут распространяться как по нормали к линиям раздела, так и вдоль них, снижая усталостную прочность.

Выбор рациональных режимов сварки. Основными параметрами процесса СТП являются [3, 5–7, 9, 14–17]: частота вращения и скорость перемещения инструмента, нагрузка и геометрия инструмента, а также угол наклона шпинделя к поверхности соединяемых материалов. Выбор геометрии инструмента и параметров процесса сварки оптимизируется для каждого конкретного свариваемого материала. При увеличении частоты вращения увеличивается тепло-

вложение в металл. Отсутствие правильной оценки технологической свариваемости и физико-механических свойств соединяемых сплавов и конструктивных особенностей соединений может приводить к проблеме, связанной с изменением структуры материалов и дефектами в зоне сварки, которые вызывают неизбежное ухудшение механических характеристик сварных соединений.

Экологические преимущества. СТП является экологически чистым технологическим и безопасным процессом для окружающей среды. При его проведении отсутствуют выделения вредных веществ (аэрозолей, дыма, брызг и пр.), а также электромагнитное и радиационное излучение.

Технико-экономические преимущества связаны с такими факторами, как: малый расход энергии (~2,5 % от энергии, потребляемой при лазерной сварке; ~10 % от энергии, потребляемой при электродуговой сварке); отсутствие особых требований к процессу сварки и необходимости в подготовке кромок до сварки и механической обработке после нее; возможность получения сварных швов в любом пространственном положении; высокая размерная стабильность и воспроизводимость процесса; высокая скорость сварки; выполнение сварки без использования присадочных материалов, флюсов и других расходных материалов; отсутствие потребности в защите зоны сварки, за исключением сварки активных металлов; возможность экономии дорогостоящих материалов за счет возможности сваривания разнородных металлов и сплавов; отсутствие влияния человеческого фактора ввиду полной автоматизации процесса и контроля параметров в процессе сварки (не требуется сварочный персонал высокой квалификации); снижение веса сварных конструкций при использовании легких сплавов; быстрая окупаемость, обусловленная низким потреблением энергии и отсутствием расходных материалов; стыки не требуют очень точной подготовки кромок (для листов толщиной 1,6 мм зазор

может быть до 0,2 мм, для листов толщиной 12,7 мм — до 1,25 мм); возможность получения сварных швов за один проход при толщине свариваемых заготовок до 70 мм; в большинстве случаев не требуется дополнительная термическая обработка сварного шва; получение сварных швов большой длины и глубины; простота автоматизации и контроля параметров процесса (полностью автоматизированный повторяемый процесс с ограниченным числом задействованных переменных); сокращение производственного цикла на 50–75 % по сравнению с традиционными видами сварки плавлением

Недостатки СТП. Несмотря на существенные преимущества, способы сварки трением с перемешиванием имеют ряд ограничений для широкого промышленного применения, особенно в условиях малосерийного производства:

- необходимость жесткого закрепления свариваемых деталей (свариваемая деталь должна быть прижата к опорной пластине, чтобы избежать отрыва и стекания материала при погружении и перемещении инструмента) затрудняет создание мобильных устройств для СТП;

- возникновение отверстий в начале и конце сварного шва, что требует использования специальных конструктивно-технологических приемов;

- трудность выполнения некоторых видов сварных соединений, если для их образования требуется присадочный материал (например, угловых швов);

- низкая универсальность. Машины для СТП не обладают достаточной гибкостью, а некоторые сварные конструкции требуют использования дополнительных операций сварки плавлением, обычно ручной. Кроме того, специализированные и специальные машины для СТП, разработанные для конкретных применений, требуют больших капитальных вложений;

- недостаточная стойкость инструмента для СТП материалов с высокой температурой плавления по-прежнему является од-

ной из проблем, ограничивающих использование СТП в некоторых перспективных применениях;

- необходимость проектирования и изготовления специальных инструментов для ряда материалов и видов сварных соединений;

- невозможность сварки материалов, имеющих низкую пластичность, даже при высоких температурах, или теряющих требуемые механические свойства в результате термопластической деформации.

Все эти проблемы постепенно решаются по мере развития теории и практики применения СТП.

Выбор материала сварных конструкций. При конструировании новых и усовершенствовании выпускаемых изделий существенного внимания требуют вопросы обеспечения технологичности их конструкций. Уже на стадии эскизного проектирования и при изготовлении опытных образцов изделия следует подвергать тщательной технологической отработке, особенно при подготовке к их серийному производству. Прогрессивность сварных конструкций характеризуется возможностью уменьшения их металлоемкости при обеспечении требуемых эксплуатационных качеств, более полным использованием свойств материалов. Наряду с преимуществами среди неразъемных соединений сварка имеет некоторые отрицательные особенности. Сварочные процессы оказывают существенное воздействие на исходные свойства материала, напряженное состояние и деформации сварных конструкций, неоднородность свойств материала в зоне сварных соединений и др. Эти особенности влияют на качество, надежность и долговечность изделий.

Создание современных сварных конструкций заданной надежности при минимальной их стоимости требует комплексного конструкторско-технологического проектирования, при котором вопросы прочности и надежности увязываются с особенностями физических явлений, протекающих в металле под воздействием различных технологических процессов, в осо-

бенности сварочных. Технологический процесс сварки вносит существенные изменения в механические характеристики металла шва и зоны, подверженные высокотемпературному нагреву. Использование различных технологий сварки можно снизить механическую неоднородность сварного соединения, но избавиться полностью не удается. Из-за различия в термических циклах ряд сталей может иметь в околосварочной зоне повышенную твердость и прочность. ЗТВ — зона высокого отпуска у термически обработанных сталей, металл в данном месте характеризуется пониженной прочностью и твердостью в результате сварочного нагрева. Изменение свойств зависит от марки стали и обработки.

Оптимизация параметров конструкций осуществляется с учетом различных условий и ограничений, а также особенностей, свойственных сварным соединениям, таким как остаточные напряжения, структурные, химические и геометрические неоднородности, наличие дефектов и пр. Проектирование сварного соединения, как указывают авторы работы [18], представляет собой сложный, многостадийный процесс, который требует учета различных факторов и свойств материалов и их соединений, таких как усталостная прочность, структурная целостность, качество поверхности, технологичность получения, поглощение энергии, шум, вибрация и жесткость. Выбор материала и проектирование технологического процесса сварки с использованием разнородных металлов и сплавов приводит к необходимости учитывать химическое и термодинамическое взаимодействие соединяемых элементов. Чтобы спроектировать высокопрочное соединение из разнородных сплавов, например на основе алюминия и титана, требуется обширная база инженерных знаний в области материаловедения, химического и структурного анализа, физико-механических испытаний, применение математических мето-

дов и инструментов компьютерного моделирования.

На рисунке 1 приведена упрощенная схема выбора основного материала сварной конструкции на стадии проектирования. Конечной целью такого проектирования является получение сварной конструкции с заданной надежностью. Прежде всего тщательно анализируют конструкторско-технологические, функциональные и технико-экономические требования к проектируемой сварной конструкции, сформулированные на стадии разработки технического задания и эскизного проектирования, и выбирают наиболее важные критерии выбора материалов. Например, актуальной задачей для автомобильной промышленности является снижение массы для повышения эффективности использования топлива и сокращения выбросов CO₂. Детали кузова автомобиля оказывают огромное влияние на общую массу автомобиля, поэтому все чаще переходят к внедрению в автомобильный кузов различных легких материалов: листов алюминиевых и магниевых сплавов, современных высокопрочных сталей и др. Конструкции из нескольких материалов часто являются оптимальным решением. Критерии выбора материала сильно зависят также от стоимости и процесса его изготовления [19, 20]. Высокопрочные стали (HSS) обладают большим потенциалом снижения веса и используются не только для снижения веса кузовов автомобилей, но и для повышения их ударостойкости. При выборе материала учитывают его технологическую свариваемость трением с перемешиванием, а также производственную технологичность изготовления из этого материала составных деталей и заготовок сварной конструкции. При этом используют соответствующие базы данных. После оценки значений параметров свойств сварных соединений их сопоставляют с требуемыми и переходят к следующему этапу проектирования или повторяют действия по выбору материала.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

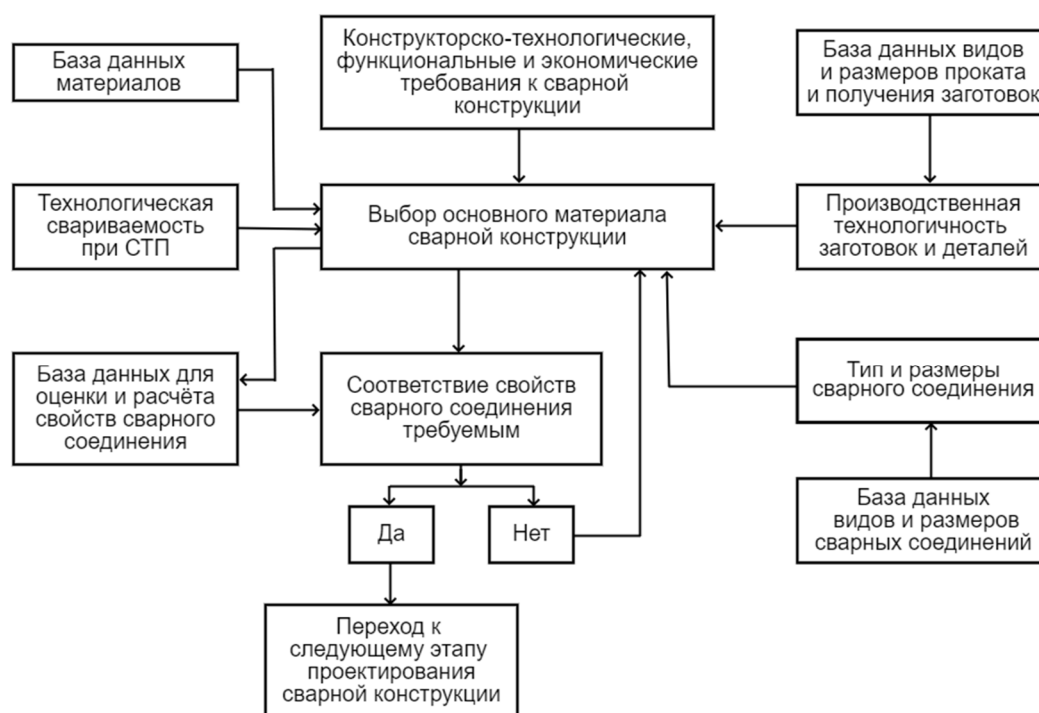


Рисунок 1 — Алгоритм выбора материала конструкции при сварке трением с перемешиванием

Выводы:

1. Рассмотрены особенности выбора современных материалов с улучшенными свойствами для конструкций со сварными соединениями.

2. При выборе материалов соединений, получаемых сваркой трением с перемешиванием, следует учитывать технологиче-

ские особенности, преимущества и недостатки этого способа.

3. Применение сварки трением с перемешиванием открывает широкие возможности внедрения более эффективных материалов с улучшением показателей технологичности сварных конструкций на всех этапах их жизненного цикла.

Список источников

1. Albiñana J. C., Vila C. A framework for concurrent material and process selection during conceptual product design stages // *Materials and design*. 2012. № 41. P. 433–446.
2. Ashby M. F. *Materials selection in mechanical design*. Third ed. Butterworth-Heinemann, 2005. 602 p.
3. A comprehensive review of friction stir techniques in structural materials and alloys: challenges and trends / D. A. P. Prabhakar [et al.] // *Journal of materials research and technology*. 2022. № 20. P. 3025–3060.
4. Magalhães V. M., Leitão C., Rodrigues D. M. Friction stir welding industrialisation and research status // *Science and technology of welding and joining*, 2018. 23:5. P. 400–409. DOI: 10.1080/13621718.2017.1403110
5. Получение сварного соединения пластин из титановых сплавов методом сварки трением с перемешиванием / И. К. Черных [и др.] // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018. Т. 6. № 1. С. 198–207.
6. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing // *Materials Science and Engineering*. 2005. R 50. P. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
7. Vilaça P., Gandra J., Vidal C. Linear Friction based processing technologies for aluminum alloys: surfacing, stir welding and stir channeling. Chapter 7 // *Aluminium alloys — new trends in fabrication and applications* / ed. by Zaki Ahmad. IntechOpen, 2012. P. 159–197.

8. Стаценко В. Н., Негода Е. Н., Сухорада А. Е. Исследование тепловложения и температурных полей при сварке трением с перемешиванием // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2017. № 3 (32). С. 150–154.

9. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution / A. Heidarzadeh [et al.] // Progress in materials science. 2021. № 117 (100752). P. 68.

10. Сотников А. Л., Муховатый А. А., Орлов А. А. Классификация методов неразрушающего контроля сварных соединений из меди, полученных сваркой трением с перемешиванием // Сварка и диагностика. 2022. № 3. С. 19–24. DOI: 10.52177/2071-5234_2022_03_19

11. Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools / O. Lorraina, V. Favierb, H. Zahrounic, D. Lawrjaniecd // Journal of materials processing technology. 2010. № 210 (4). P. 603–609.

12. Особенности формирования сварного соединения сплава ВТ14 сваркой трением с перемешиванием с использованием жаропрочного инструмента из сплава ЖС6У / А. И. Амиров [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24. № 4. С. 53–63. DOI:10.17212/1994-6309-2022-24.4-53-63

13. Колубаев Е. А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 1–2.

14. Барахтин Б. К., Высоцкая М. А. Применение системного анализа структуры для оптимизации режимов сварки трением с перемешиванием // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов : межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова. Тверь : Твер. гос. ун-т, 2015. Вып. 7. С. 83–96.

15. A review on friction stir technology / Shubham Wadekar, Ravi Soladhra, Hemant Barkade, Nilkanth Thombare // International conference on ideas, impact and innovation in mechanical engineering (ICPIIME 2017). 2017. Vol. 5 Iss. 6. P. 1542–1549.

16. Способы повышения качества швов, полученных при помощи сварки трением с перемешиванием / И. Л. Чекалин, И. К. Черных, Е. В. Кривонос, Е. В. Васильев // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 43–46.

17. Бойцов А. Г., Качко В. В., Курицын Д. Н. Высокоскоростная сварка трением перемешиванием авиационных материалов и конструкций // Металлообработка. 2013. № 5–6 (77–78). С. 35–42.

18. Modi S., Stevens M., Chess M. Mixed material joining advancements and challenges // Center for automotive research, Ann Arbor, MI. May 2017. 29 p.

19. A review on advanced joining techniques of multi material part manufacturing for automotive industry / Celalettin Yuce, Fatih Karpat, Nurettin Yavuz, Oguz Dogan // International journal of mechanical and production engineering. 2015. Vol. 3. Iss. 5. P. 63–68.

20. Thomas W. M., Nicholas E. D. Friction stir welding for the transportation industries // Materials & Design. 1997. Vol. 18. Nos. 4/6. P. 269–273.

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

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Вишневским Д. А., д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ им. проф. В. Я. Седуша ДонНТУ Сотниковым А. Л.

Статья поступила в редакцию 27.11.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Денисова Наталья Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. машин металлургического комплекса

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

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия
e-mail: pavelpetrov@list.ru

Орлов Андрей Андреевич, ассистент каф. машин металлургического комплекса

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru

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

ENSURING THE MACHINABILITY OF STRUCTURES DURING FRICTION STIR WELDING AT THE MATERIAL SELECTION STAGE. PART 1: GENERAL PRINCIPLES

The interrelation between the expansion processes of modern structural materials and refined operational and other properties, as well as the development of methods for their processing and producing fixed joints, predominantly welded. Recommendations are given for selecting criteria for the complex selection of main construction materials. The limitations of applying the traditional methods of fusion welding in creating high-tech structures and the prospect of large-scale implementation of friction stir welding are described. The article briefly examines and analyzes the uniqueness of weld joints forming during friction stir welding (FSW), considering the flow of thermal, metallurgical, and thermal deformation processes, interactions between materials with their gripping, as well phase and structural changes in metals. The notions about technological weldability at FSW and the choice of rational welding mode are examined. The algorithm of design material selection for friction stir welding is considered.

Key words: building materials, fixed joints, welded joint, methods of fusion welding, operative weldability, machinability of structures.

References

1. Albiñana J. C., Vila C. A framework for concurrent material and process selection during conceptual product design stages. *Materials and Design*. 2012. No. 41. Pp. 433–446.
2. Michael F. Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*. Third Edition. Butterworth-Heinemann. 2005. 602 p.
3. Prabhakar D.A.P. [et al.]. A comprehensive review of friction stir techniques in structural materials and alloys: challenges and trends. *Journal of materials research and technology*. 2022. No. 20. Pp. 3025–3060.
4. Magalhães V. M., Leitão C., Rodrigues D. M. Friction stir welding industrialisation and research status. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2018. 23:5. Pp. 400–409. DOI: 10.1080/13621718.2017.1403110
5. Chernyh I. K. [et al.]. Welding of plates made of titanium alloys by friction stir welding [Poluchenie svarnogo soedineniya plastin iz titanovyh splavov metodom svarki treniem s peremeshivaniem]. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2018. Vol. 6. No.1. Pp. 198–207. (rus)
6. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*. 2005. R 50. Pp. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001
7. Vilaça P., Gandra J., Vidal C. Linear Friction Based Processing Technologies for Aluminum Alloys: Surfacing, Stir Welding and Stir Channeling. Chapter 7. *Aluminium Alloys — New Trends in Fabrication and Applications*, ed. by Zaki Ahmad. IntechOpen. 2012. Pp. 159–197.

8. Stacenko V. N., Negoda E. N., Suhorada A. E. Study of heat and temperature fields during friction stir welding [Issledovanie teplovlozheniya i temperaturnykh polej pri svarke treniem s peremeshivaniem]. *Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*. 2017. No. 3 (32). Pp. 150–154. (rus)
9. Heidarzadeh A. [et al.]. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. *Progress in Materials Science*. 2021. No. 117 (100752). 68 p.
10. Sotnikov A. L., Muhovatyj A. A., Orlov A. A. Classification of non-destructive testing methods for welded compounds from copper obtained by friction stir welding [Klassifikaciya metodov nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedinenij iz medi, poluchennykh svarkoj treniem s peremeshivaniem]. *Welding and Diagnostics*. 2022. No. 3. Pp. 19–24. (rus) DOI: 10.52177/2071-5234_2022_03_19
11. Lorraina O., Favierb V., Zahrounic H., Lawrjaniec D. Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. No. 210 (4). Pp. 603–609.
12. Amirov A. I. Features of BT14 alloy weld joint formation by friction stir welding using heat-resistant tool made of ZhC6U alloy [Osobennosti formirovaniya svarnogo soedineniya splava VT14 svarkoj treniem s peremeshivaniem s ispol'zovaniem zharoprochnogo instrumenta iz splava GS6U]. *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2022. Vol. 24. No. 4. Pp. 53–63. (rus) DOI:10.17212/1994-6309-2022-24.4-53-63
13. Kolubaev E. A. Features of the weld joint structure formation, obtained by friction stir welding [Osobennosti formirovaniya struktury svarnogo soedineniya, poluchennogo svarkoj treniem s peremeshivaniem]. *Modern Problems of Science and Education*. 2013. No. 6. Pp. 1–2. (rus)
14. Barahtin B. K., Vysockaya M. A. Application of structural system analysis to optimize friction stir welding modes [Primenenie sistemnogo analiza struktury dlya optimizacii rezhimov svarki treniem s peremeshivaniem]. *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials: intercollegiate proceedings. Under the general editorship of Samsonova V. M., Sdobnyakova N. Yu. Tver : Tver State University, 2015. Iss. 7. Pp. 83–96. (rus)*
15. Shubham Wadekar, Ravi Soladhra, Hemant Barkade, Nilkanth Thombare. A Review on Friction Stir Technology. *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering (ICIIME 2017)*. Vol. 5. Iss. 6. Pp. 1542–1549.
16. Chekalin I. L., Chernyh I. K., Krivonos E. V., Vasil'ev E. V. Methods for improving the quality of seams obtained by friction stir welding [Sposoby povysheniya kachestva shvov, poluchennykh pri pomoshchi svarki treniem s peremeshivaniem]. *Omsk scientific bulletin*. 2017. No. 5 (155). Pp. 43–46. (rus)
17. Bojcov A. G., Kachko V. V., Kuricyn D. N. High speed friction stir welding of aviation materials and structures [Vysokoskorostnaya svarka treniem peremeshivaniem aviacionnykh materialov i konstrukcij]. *Metalloobrabotka*. 2013. No. 5–6 (77–78). Pp. 35–42. (rus)
18. Modi S., Stevens M., Chess M. Mixed Material Joining Advancements and Challenges. *Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI. May 2017. 29 p.*
19. Celalettin Yuce, Fatih Karpat, Nurettin Yavuz, Oguz Dogan. A Review On Advanced Joining Techniques Of Multi Material Part Manufacturing For Automotive Industry. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*. 2015. Vol. 3. Iss. 5. Pp. 63–68. ISSN: 2320–2092.
20. Thomas W. M., Nicholas E. D. Friction stir welding for the transportation industries. *Materials & Design*. 1997. Vol. 18. Nos. 4/6. Pp. 269–273.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

МАШИНОСТРОЕНИЕ

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

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

УДК 621.658.512 (035)

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

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТАДИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 2: СВАРИВАЕМОСТЬ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

В статье систематизированы состояние проблемы свариваемости легких сплавов трением с перемешиванием и перспективы ее дальнейшего развития. Рассмотрена классификация алюминиевых сплавов и оценка их свариваемости. Проблема свариваемости сплавов алюминия является наиболее изученной, как и в целом проблема получения неразъемных соединений между ними. Описаны возможности получения сваркой трением с перемешиванием соединений между алюминиевыми сплавами различных систем легирования. Показаны перспективы использования сплавов магния и дана оценка их свариваемости. Рассмотрены особенности применения и сварки титановых сплавов с оценкой их свариваемости.

Ключевые слова: *инструмент, режим сварки, система легирования, свариваемость, сварка плавлением, сварка трением с перемешиванием, технологичность сварных конструкций.*

Введение. Легкие сплавы являются основными конструкционными материалами для изделий авиационно-космической техники и транспортного машиностроения. Их развитие и усовершенствование приводит к разработке новых облегченных конструкций. С начала XX века за счет развития металлургии алюминиевых, титановых и магниевых сплавов наука и техника смогла совершить прорыв, обеспечив появление высокоэффективных изделий авиационной техники и средств наземного транспорта [1]. Алюминий, например, в настоящее время является вторым самым широко используемым металлом, и его производство прогнозируемо должно расти более быстрыми темпами, чем темпы роста всех других конструкционных металлов. Применение широко известных алюминиевых и магниевых сплавов в последнее время приобретает все большее распространение, особенно там, где имеет значение снижение веса. Большинство этих сплавов устойчиво против коррозии. Известные марки алюминиевых сплавов широко применяются в настоящее время в авиационной, судостроительной, вагоностроительной, химической и нефтяной промышленности, энергетике, автомобильном транспорте и др. Титан

и его сплавы обладают уникальным сочетанием свойств и находят множество областей применения в авиационной и химической промышленности.

Выбор сплавов для конкретной конструкции должен осуществляться с учетом условий работы как узла в целом, так и отдельных деталей, требуемого ресурса, рабочей среды и пр. Для сварных конструкций особое значение приобретает технологическая свариваемость выбираемых материалов. Однако неразъемные соединения заготовок и деталей из легких сплавов трудно получить традиционными способами сварки плавлением. Это обусловило развитие работ по сварке легких сплавов трением с перемешиванием (СТП). Анализ и отработка на технологичность сварных конструкций под сварку трением с перемешиванием затруднена из-за отсутствия доступных обобщений практического опыта в этой сфере. Результаты исследований технологии и применения СТП в России и за рубежом изложены главным образом в огромном количестве научных и технологических публикаций.

Цель данной статьи заключается в систематизации и анализе многочисленных

разработок и исследований сварки легких сплавов для обеспечения обоснованного их выбора при проектировании сварных конструкций с учетом свариваемости трением с перемешиванием.

1. Алюминиевые сплавы (АС) получают все более широкое использование вместо стали и других металлов из-за их превосходных свойств, таких как коррозионная стойкость [1], легкий вес (30 % плотности стали), хорошая обрабатываемость, высокая тепло- и электропроводность, эффективность методов производства и т. д. Алюминиевые сплавы по химическому составу подразделяют на 8 серий, характеристики которых приведены в таблице 1, составленной главным образом по данным [2] и др. При сварке АС методами плавления в сварных соединениях возникают такие дефекты, как пористость, непровар, неполное проплавление, горячие трещины и коррозия под напряжением и др.

Сплавы серии 1xxx относятся к технически чистому алюминию, хорошо поддающемуся сварке плавлением. При сварке трением с перемешиванием (СТП) технического алюминия АД0 инструментом с частотой вращения 1000 об/мин и подачей 23 мм/мин металл шва обладает большей прочностью

(92,9 МПа) по сравнению с основным металлом (80,8 МПа), разрушение образцов происходит по основному металлу [3].

Сплавы серии 2xxx относятся к системе Al–Cu. В зависимости от дополнительных легирующих элементов их можно разделить на три основные подсерии: по существу — бинарные Al–Cu, такие как AA2219, содержащие до 6 мас. % Cu; сплавы на основе системы Al–Cu–Mg, такие как AA2024, и сплавы на основе системы Al–Cu–Li, такие как AA2050, AA2198 и AA2196 [4].

Медь как легирующий элемент в сплавах Al серии 2xxx при сварке плавлением приводит к образованию горячих трещин, плохой микроструктуре затвердевания и пористости в зоне сплавления [5]. СТП позволяет получить соединения с улучшенными механическими свойствами, например, высокопрочный алюминиевый сплав AA2024-T3 обладает высокой прочностью на разрыв, усталостной прочностью, гладкой поверхностью и затрудненным распространением трещин. При этом использовали частоту вращения инструмента 360 об/мин и скорость подачи 3,3 мм/с. Варьированием параметрами СТП можно управлять неоднородностью микроструктуры швов и сопротивлением их разрушению.

Таблица 1

Классификация и свариваемость алюминиевых сплавов

Серия алюминиевых сплавов	1xxx	2xxx	3xxx	4xxx	5xxx	6xxx	7xxx	8xxx
Основной легирующий элемент	Нет (технический Al)	Cu (1,9–6,8 %)	Mn (0,3–1,5 %)	Si (3,6–13,5 %)	Mg (0,5–5,6 %)	Mg (0,4–1,5 %) + Si (0,2–1,7 %)	Zn (1,0–8,2 %)	Прочие
Термоупрочняемость	НТ	Т	НТ	НТ	НТ	Т	Т	Т/НТ
Свариваемость при сварке плавлением	С	НС	С	С	С	С	НС	С/НС
Свариваемость при сварке трением с перемешиванием	С	С	С	С	С	С	С	С

Примечание: Т — термоупрочняемые; НТ — нетермоупрочняемые; С — в основном свариваемые; НС — в основном несвариваемые.

Для сплава 1163 системы Al (3,8–4,5)–Cu (1,2–1,6)–Mg выбраны наиболее оптимальные параметры СТП [6]: частота вращения инструмента $n=400\dots600$ об/мин; скорость подачи $v=150$ мм/мин; глубина осаждения инструмента $t=0,15$ мм; конструкция инструмента — со спиральными пином и заплечиком. Прочность шва составляла 75–80 % от прочности исходного материала. При высокоскоростной сварке трением с перемешиванием их уровень находится в пределах 90...95 % прочности основного материала, а в некоторых случаях превышает прочностные характеристики основного материала свариваемой конструкции [7].

Повышение параметров режима, позволяющее вести СТП сплава Д16 (3,8...4,9% Cu, 1,2...1,8 % Mg) при температуре 450...500 °С, обеспечивает степень пластификации материала, при которой получаются сварные соединения с качественной структурой и высокими механическими свойствами [8]. В этих условиях направление сварки относительно направления прокатки исходного материала оказывает влияние: при сварке вдоль направления прокатки предел прочности соединения достигает значения 92 %, а при сварке поперек — 95 % от предела прочности исходного материала.

Оптимизация режима СТП в сочетании с приложением ультразвукового воздействия обеспечивает прочность сварных соединений на уровне 89–93 % от прочности исходного сплава Д16Т, что соответствует уровню прочностных характеристик ответственных сварных соединений в конструкциях и способствует повышению прочности сварных соединений на величину не менее 13 % [9].

При СТП сплава Д16 инструментом типа bobbin tool происходит экструзия материала из сварного соединения и его разуплотнение [10]. В результате образуются протяженные дефекты, причем в конце сварного шва независимо от режима сварки. Получение бездефектных сварных соединений

требует обязательного использования различных методов неразрушающего контроля в сочетании с адаптивным регулированием технологических параметров непосредственно в процессе СТП.

СТП позволяет получить высокое качество сварных соединений из алюминиевого сплава Al — 2 %, Cu — 2 %, Mn — 0,4 %, Si — 0,2 % Zr % (мас.), который отличается от марочных сплавов серии 2xxx более высоким содержанием дисперсоидов на основе Mn [11]. Сварной шов практически сохраняет исходную прочность основного металла ($\sigma_b=280-290$ МПа) при существенном повышении относительного удлинения δ (от 3 до 12–16 %). Повышение пластичности обусловлено формированием в зоне шва ультрамелкозернистой структуры (размер зерна менее 5 мкм), что объясняется протеканием динамической рекристаллизации в процессе СТП.

Сплавы серии 3xxx относятся к системе Al–Mn (АМц), отличаются высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью. Хорошо свариваются газовой, атомно-водородной, аргонодуговой и контактной сваркой. Сплавы серии 3xxx хорошо деформируются в холодном состоянии и в горячем в температурном интервале 320–470 °С. Термической обработкой не упрочняются. Пластическая деформация упрочняет сплавы почти в 2 раза.

Сплавы серии 4xxx относятся к системе Al–Si, являются литейными и хорошо свариваются.

Сплавы серии 5xxx относятся к системе Al–Mg. Это термически неупрочняемые сплавы, обладающие хорошими прочностными свойствами, которые получили широкое распространение благодаря высокой коррозионной стойкости и свариваемости [12]. В отожженном состоянии эти сплавы показывают низкий предел текучести, который варьируется от 90 до 160 МПа в зависимости от содержания магния. Использование сварки трением с перемешиванием (СТП), в основе которой лежат

процессы интенсивной пластической деформации (ИПД) при повышенной температуре, позволяет повысить прочностные характеристики Al-Mg сплавов. В сварном шве формируется мелкозернистая или ультрамелкозернистая структура (УМЗ), которая обеспечивает высокие механические свойства. В зависимости от режима СТП прочность шва в термически неупрочняемых сплавах может не только достигать прочности основного материала в отожженном состоянии, но и превосходить его. Применение СТП эффективно вместо сварки плавлением для изготовления из алюминиевых сплавов системы Al-Mg конструкций, работающих в условиях переменных нагрузок. Долговечность стыковых соединений листов, выполненных СТП, практически достигает уровня основного материала, тогда как для соединений, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, она почти в 2 раза ниже.

В настоящее время отмечается существенный рост интереса к применению алюминиевых деформируемых сплавов в автомобилестроении, вагоностроении, судостроении и ряде других отраслей промышленности [13]. Легирование цинком в количестве до 1 % системы Al-Mg с концентрацией магния на уровне 5,2–5,6 % позволило создать новую композицию сплава 1565ч, обладающую большей прочностью по сравнению с традиционным сплавом АМг5. Это позволяет снизить массу сварной конструкции за счет использования для изготовления деталей полуфабрикатов меньшей толщины. Сплав 1565ч обладает хорошей свариваемостью. Коэффициент прочности сварных соединений при сварке плавлением составляет 0,8–0,85, а при сварке трением с перемешиванием — 0,92–0,95. Сплав 1565ч и его сварные соединения обладают высокой коррозионной стойкостью. Термической обработки сварных соединений, в отличие от сплавов системы Al-Zn-Mg, после сварки не требуется. Сварные конструкции, изготовленные из сплава 1565ч, могут

эксплуатироваться в широком диапазоне температур, вплоть до криогенных. Получают развитие сплавы системы Al-Mg-Zn, Al-Mg-Si и Al-Mg-Sc. Использование сплава 1565ч (Al-Mg-Zn) вместо сплава АМг5 позволяет снизить массу конструкции на 8–10 % за счет большей прочности сплава в сравнении с АМг5. Коэффициент прочности сварных соединений при сварке плавлением составляет 0,8–0,85, а при СТП — 0,92–0,95. Сплав 1565ч и сварные соединения обладают высокой коррозионной стойкостью. Термообработки сварных соединений, в отличие от сплавов Al-Zn-Mg, после сварки не требуется.

Выбор сплавов системы Al-Mg-Sc дает возможность обеспечения достаточно высокого уровня прочностных свойств без применения трудно реализуемой на практике упрочняющей термической обработки (заковки и старения) крупногабаритных деталей [14]. Сплавы системы Al-Mg-Sc обладают высокими показателями свариваемости при сварке плавлением, как с применением присадочной проволоки, так и без нее. Сварка трением с перемешиванием является перспективной технологией получения герметичных неразъемных соединений из листов и толстостенных плит сплава 1570С, прочность сварного шва может достигать уровня 95–100 % прочности основного металла. Удорожание полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, легированных скандием, по сравнению со стоимостью полуфабрикатов, не содержащих его, составляет 60–80 %. Такое удорожание компенсируется увеличением запаса прочности и существенным снижением веса конструкций.

При устранении дефектов швов повторные проходы СТП не оказывают существенного влияния на структуру и свойства сварных соединений листов из сплава 1565чМ [15]. Возможно использование двух- и трехкратных повторных проходов для подварки дефектных участков в виде протяженных несплавлений и несплавлений в корневой части шва. Если суммарная длина дефектных участков превышает 25–30 % от общей длины шва,

то, как правило, осуществляют повторную переварку сварного шва на полную длину. Для выполнения подварки на всю длину шва для гарантированного устранения дефектов рекомендуется использовать инструмент, аналогичный по профилю рабочему инструменту, но с увеличенными размерами бурта и стержня примерно на 20–25 %. Допускается исправление непротяженных дефектов соединений СТП свариваемых алюминиевых сплавов типа 1565чМ ручной аргонодуговой сваркой.

Сварные соединения сплавов типа 1565чМ, выполненные сваркой трением, по сопротивлению усталости, ударной вязкости и твердости сварного шва имеют преимущество по сравнению с аргонодуговой и плазменной сваркой [16].

Сплавы серии бxxx относятся к системе Al–Mg–Si. Различают два типа сплавов серии бxxx [4]: сплавы с низким содержанием меди и сплавы с высоким содержанием меди. Сплавы с избытком Si также могут образовывать фазу чистого Si. Помимо основных легирующих элементов (Mg и Si), обеспечивающих твердорастворное и дисперсионное упрочнение, сплавы бxxx серии дополнительно легируют медью (с целью дальнейшего повышения механических свойств), хромом (с целью компенсации неблагоприятного воздействия меди на коррозионные свойства), а также марганцем, который совместно с хромом препятствует сегрегации кремния по границам зёрен [17]. Требуемые температурные условия в ходе СТП могут быть реализованы при использовании комбинации высокой частоты вращения инструмента и высокой скорости сварки, что в совокупности со стандартной процедурой послесварочного старения может обеспечить получение высокопрочных сварных соединений.

Сплавы серии 7xxx относятся к системе Al–Zn–Mg и являются одними из самых прочных алюминиевых сплавов [18]. Механизмы образования соединения между заготовками из сплава AA7075 и заготовками из малоуглеродистых сталей аналогичны

по причине сходства их прочностных свойств. При СТП стыковых соединений пластин сплава AA7050 толщиной 5,5 мм с частотой вращения инструмента 800 об/мин и подачей 100 мм/мин в трех средах (горячая или холодная вода, воздух) более высокими механическими свойствами обладали соединения, полученные в среде горячей воды. Соотношение относительного удлинения этих соединений и основного материала достигало 150 %, а предела прочности — 92 %. При СТП сплава AA7075-T6 толщиной 12 мм (350 об/мин; 60 мм/мин) стойкость к точечной коррозии сварного соединения выше, чем у основного металла.

Алюминиево-литиевые сплавы являются новыми материалами благодаря их высокому соотношению прочности и веса, отличной усталости и высокой вязкости [5, 18]. Наиболее распространенными типами сплавов Al–Li являются Al–Cu–Li и Al–Mg–Li. Сплавы Al–Cu–Li имеют более высокую прочность по сравнению с Al сплавами серии 7xxx и поэтому предназначены для использования в высокопрочных технических приложениях. Сплавы Al–Mg–Li чрезвычайно легки (плотность равна 2,54 г/см³) и обладают умеренной прочностью, эквивалентной сплавам Al 2xxx (кроме сплавов Al–Cu–Li) и сплавам Mg–Li. Сплав AA1424 (Al–Mg–Li–Zr) представляет собой термообрабатываемый сплав, разработанный на основе сплавов 1420 и 1421. Сварка плавлением сплавов Al–Li приводит к обычным дефектам, таким как горячие трещины, поры, потеря элементов и размягчение соединений, что приводит к низкой прочности соединения и ограничивает дальнейшее применение сплавов Al–Li. Устранение таких дефектов достигается применением СТП [5, 18]. Для различных сплавов толщиной от 2 до 5 мм в процессе СТП с различной формой инструмента при частоте вращения от 200 до 1200 об/мин и подаче от 42 до 550 мм/мин достигалась прочность сварного соединения 64–80 % от прочности основного металла [5, 18, 19].

Литейные алюминиевые сплавы удовлетворительно свариваются методами сварки плавлением. Перспективным является сплав ВАЛ10, относящийся к системе Al–Cu–Mn и отличающийся по химическому составу от сплава АЛ19 несколько меньшим содержанием меди и марганца, наличием добавки кадмия и большей чистотой по примесям кремния и железа [20]. Использование присадочной проволоки Св1203 при ручной аргонодуговой сварке сплава ВАЛ10 обеспечивает удовлетворительное формирование соединений и достаточно высокий уровень механических свойств. Сварка трением с перемешиванием обеспечивает увеличение коэффициента прочности соединений литейного алюминиевого сплава ВАЛ10 до 0,75, что существенно выше, чем при ручной аргонодуговой сварке (0,45). При СТП использовали инструмент из стали Р18 с пином диаметром 5 мм и длиной 6 мм с винтовой канавкой глубиной 0,4 мм. Диаметр заплечика — 18 мм. Перед сваркой фрезерованием полностью удаляли с поверхности заготовок литейную корку. Частота вращения инструмента 650–800 об/мин. Скорость сварки 220–240 мм/мин. Осевое усилие прижатия инструмента 28000 Н. Сварка с двух сторон. Для повышения прочностных свойств сварных соединений сплава ВАЛ10 рекомендуется последующая термическая обработка сварных соединений после сварки: закалка с температурой 535 °С, выдержка 4 часа и последующее искусственное старение при 160 °С с выдержкой 24 часа.

Композиционные, гранулированные и квазикристаллические алюминиевые сплавы также находят применение при изготовлении эффективных сварных конструкций [21]. Процесс СТП позволяет получать качественные неразъемные соединения этих сплавов без изменения их фазово-структурного состояния. При этом гранулы, содержащие пересыщенный твердый раствор тугоплавких переходных металлов, равномерно распределяются по всему объему матрицы в металле шва, что

обеспечивает предел прочности таких соединений на уровне 70...80 % этого показателя для основного материала. В металле шва, полученного при сварке алюминиевого сплава, упрочненного квазикристаллическими частицами, интерметаллиды не образуются, а квазикристаллы, размер которых, как и в основном материале, сохраняется в пределах 100...200 нм, равномерно распределяются между зернами α -Al матрицы, обеспечивая высокие показатели прочности и пластичности швов. При сварке композиционных материалов диссоциации армирующих частиц не происходит, а их дисперсность и равномерность распределения в металле шва сохраняются на уровне основного материала.

Разноименные алюминиевые сплавы также хорошо подвергаются сварке методами СТП [4, 5]. При хорошем перемешивании можно получить широкий спектр микроструктур зоны перемешивания, тогда как при недостаточном перемешивании наблюдаются более асимметричные области сварного шва. Интересной микроструктурной характеристикой соединений разнородных алюминиевых сплавов является образование более мелких зерен на границе раздела двух материалов в зоне перемешивания. Сварка трением с перемешиванием превосходит сварку плавлением по прочности, пластичности, усталостной прочности и вязкости разрушения. В работе [5] изучено влияние изменения скорости перемещения СТП от 50 до 200 мм/мин при постоянной скорости вращения 300 об/мин на механические свойства и микроструктуру однородных и разнородных стыковых соединений АА7075-T6 и АА5083-H111. Примененные параметры СТП позволили получить бездефектные соединения. Заметное измельчение зерна достигнуто в зонах перемешивания (ЗП) всех одинаковых и разнородных швов. Профиль твердости аналогичных сварных швов АА7075 показал типичное поведение для стареющих алюминиевых сплавов с потерей твердости в ЗП, а в случае аналогичных сварных швов

AA5083 — типичное поведение для нагартованных алюминиевых сплавов с выявленным увеличением твердости ЗП. Напротив, в разнородных сварных швах наблюдался плавный переход профиля твердости между двумя значениями твердости сплавов AA7075 и AA5083. Кроме того, разнородные соединения показали, что прочность находится в диапазоне от 245 до 267 МПа при эффективности сварного соединения от 77 до 87 % от прочности AA5083 ВМ.

В работе [22] проведен сравнительный анализ степени разупрочнения и уровня прочности сварных соединений разноименных высокопрочных сложнолегированных алюминиевых сплавов АМг6М, 1420, 1201, 1460 толщиной 1,8 мм, полученных сваркой трением с перемешиванием, а также аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом. Показано, что деформационное упрочнение швов высокопрочных сложнолегированных алюминиевых сплавов при сварке трением с перемешиванием обеспечивает более высокий уровень их прочности, чем при сварке плавлением. Высокопрочные алюминиевые сплавы АМг6 (Al–Mg–Mn) и 1201 (Al–Cu–Mn), а также литийсодержащие сплавы 1420 (Al–Mg–Li) и 1460 (Al–Cu–Li) имеют повышенную удельную прочность. Измельчение зерен, увеличение объемной доли их границ и дробление интерметаллидных фаз в металле швов, выполненных способом СТП на разноименных алюминиевых сплавах, позволяют получить более высокие значения временного сопротивления сварных соединений, чем при сварке плавлением.

В работе [23] проведена оценка свариваемости и свойств сварных соединений листов сплава 1565ч со сплавами АМг5, АМг6, АВ (Al–Mg–Si) и 7021 (Al–Zn–Mg). Сплавы АМг5, АМг6, АВТ1 и 7021Т6 обладают хорошей свариваемостью со сплавом 1565чМ в условиях СТП. Разрушение сварных соединений, выполненных аргонодуговой сваркой и СТП 1565чМ + АМг5М, 1565чМ + АМг6М, 1565чМ + АВТ1, происходит по зоне термического влияния со

стороны сплавов АМг5, АМг6 и АВ, а сварного соединения 1565чМ + 7021Т6 — со стороны сплава 1565чМ после естественного старения. Ядро соединения, сформировавшееся в результате совместной пластической деформации разнородных сплавов 7021Т6 и 1565чМ в процессе сварки трением с перемешиванием, включает в себя по два участка из этих сплавов с четко выраженной границей между ними без внутренних дефектов. Участки имеют форму, вытянутую в направлении вращения инструмента и, соответственно, S-образную границу между сплавами. Установлено существенное ускорение диффузионных процессов на границе между соединяемыми сплавами в процессе СТП. В ядре соединения из сплавов 7021Т6 и 1565чМ формируется рекристаллизованная структура с равноосными зернами размером 2...4 мкм. Такая структура формируется независимо от исходной зеренной структуры, химического и фазового составов соединяемых сплавов. Ее формирование вызвано протекающими одновременно процессами динамической рекристаллизации. Для всех сочетаний исследуемых сплавов прочностные и пластические характеристики соединений, выполненных СТП, превосходили значения аналогичных свойств соединений, полученных автоматической аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом. Максимальное разупрочнение металла для термически упрочняемых алюминиевых сплавов при сварке трением с перемешиванием наблюдается в зоне термического влияния на участке нагрева до температуры 230...260 °С.

В работе [24] проведена оценка принципиальной возможности повторения описанных в других публикациях случаев сварки заготовок из медных сплавов, содержащая необходимый набор сведений о параметрах процесса и режимах сварки деталей.

В ходе эксперимента использовались пластины из алюминиевого сплава А7Е с толщиной 6 мм, которые были размещены на подложке из стали. Заготовки были

установлены и закреплены на станке с помощью специальных зажимов. Было проведено три эксперимента с различными параметрами сварки, включая глубину погружения (0,5...0,6 мм) и длину хвостовика (130 и 78 мм) используемого инструмента.

Сплав А7Е, относящийся к алюминиевым сплавам АК7 с высоким содержанием кремния, демонстрирует динамическую рекристаллизацию в сварном шве. При быстром охлаждении, периферийные области сварного шва на поперечном шлифе испытывают неполную или несостоявшуюся рекристаллизацию, сохраняя вытянутые зерна при уменьшении их размера. Условный диаметр рекристаллизованных зерен колеблется в пределах 40–60 мкм в зависимости от области сварного стыка при размере исходного зерна образца 200 мкм.

2. Магниевые сплавы с повышенными характеристиками прочности и жаропрочности являются перспективными наиболее легкими конструкционными материалами, обладающими, по сравнению с другими металлическими конструкционными материалами, рядом преимуществ: малой плотностью, высокими удельной прочностью и удельной жесткостью, хорошими демпфирующими характеристиками, сопротивлением усталости и технологичностью [24, 25].

Из легких металлов алюминий в 1,5 раза и титан в 2,5 раза тяжелее магния, сталь тяжелее последнего в 4 раза. Этим объясняется повышенный интерес к применению сплавов магния в различных отраслях промышленности как у нас в стране, так и за рубежом [26]. Магниевые сплавы марок МА2-1, МА12, ИМВ2, ИМВ2-1, а также сплавы систем легирования Mg–Zn–Zr–Ce и Mg–Nd–Zr могут успешно свариваться дуговыми способами. Коэффициент прочности соединений для большинства из них находится в пределах 0,9...1,0 основного металла. Другие прочностные показатели соединений также находятся на уровне свойств основного металла при высокой плотности металла шва. Основной проблемой при сварке магневых сплавов

является предупреждение образования горячих трещин в сварных соединениях. Прочностные характеристики сварных соединений высокопрочных магниевых сплавов находятся на уровне не ниже 95 % аналогичных свойств основного металла.

Однако из-за неблагоприятных свойств, как, например, образование крупных зерен, хрупких интерметаллидов, трещин, пустот и оксидных слоев, которые проявляют магниевые сплавы при сварке плавлением, СТП является одним из лучших способов сварки этих сплавов. В [27] обобщены результаты исследования СТП магниевых сплавов AZ61A (5,8...7,2 % Al, 0,4...1,5 % Zn); AZ31A (3 % Al, 1 % Zn); AZ91 (99,0–99,5 % Mg). Хорошие результаты получены при различных условиях СТП: форма, размеры, материал инструмента; частота вращения и скорость сварки; осевое усилие. Инструменты изготавливали из различных сталей — быстрорежущей, инструментальной, нержавеющей; форма пина — цилиндрический, конический, резьбовой, комбинированный и др. с диаметром 3,175, 4,85 и 6 мм; плоский заплечик диаметром 15–21, 18, 12, 9,5 мм; частота вращения, об/мин — 700–1000, 900–1800, 1800, 2000; подача — 30–50, 40, 50 мм/мин и 5–35 мм/с; осевое усилие — 5, 3–5 кН.

3. Титановые сплавы. Высокая удельная прочность при повышенных температурах, повышенная вязкость разрушения и коррозионная стойкость обеспечивают широкое применение титана и его сплавов в аэрокосмической промышленности [28]. Их подразделяют на четыре категории: а) нелегированный или чистый Ti, б) сплавы α -Ti и близкие к α -Ti, в) сплавы $\alpha+\beta$ и г) сплавы β -Ti. Температура перехода β соответствует температуре, выше которой существует только β -фаза.

Для сварки изделий из титановых сплавов, как правило, применяется сварка плавлением, сопровождающаяся рядом проблем, связанных с физико-технологическими свойствами титана. Низкая теплопроводность, чувствительность к

термическому циклу, высокая химическая активность титана и его сплавов значительно усложняют технологию сварки, что негативно сказывается на себестоимости и трудоемкости сварочных операций, а также ограничивают применение титановых сплавов в промышленности [29].

Обобщению большинства современных публикаций по СТП титановых сплавов, оценке влияния режимов сварки геометрии инструмента на свойства и структуру сварных соединений посвящена работа [29].

При сварке сплавов Ti–6Al–4V толщиной 3 мм на следующих режимах СТП: частота вращения инструмента — 500 об/мин; скорость сварки от 40 мм/мин до 200 мм/мин; угол наклона инструмента $1,5^\circ$ достигалась прочность соединения 1040 МПа при 40 мм/мин и 716 МПа при 200 мм/мин. Отсутствие проплавления и дефекты наблюдались при скорости сварки 200 мм/мин вследствие недостаточного тепловыделения. При более низкой скорости дефекты отсутствовали. При сварке листов толщиной 2 мм применялся защитный газ (аргон) с расходом 20 л/мин. В качестве материала пина использовался сплав W–Re25 %, а в качестве материала заплечика — сплав на основе никеля GH4043. Частота вращения инструмента варьировалась в диапазоне 700...11200 об/мин, а скорость сварки — 20 и 30 мм/мин.

При СТП титанового сплава TC4 толщиной 2 мм инструментом с пином из материала W–Re в среде аргона в направлении, перпендикулярном прокатке листа, при скорости вращения инструмента 400 об/мин и скорости сварки 50 мм/мин соотношение прочности на растяжение соединения и основного металла составляет 0,92. Соединение разрушается по сварному шву, и поверхность излома имеет типичные характеристики пластического разрушения, при

этом ЗТВ имеет более низкую твердость, чем основной металл.

В большинстве исследований по СТП титановых сплавов для оценки влияния режимов сварки на свойства и структуру сварных соединений прочность соединений достигала от 80 до 93 % прочности основного металла, при этом в некоторых случаях разрушение образцов при испытании на растяжение происходило по зоне термического влияния и по основному металлу. Структура сварного шва отличалась от структуры основного металла. Зона термического влияния имела более низкую твердость, чем основной металл, в то время как сварной шов является самой слабой частью соединения. Также для предотвращения окисления сварка выполнялась в среде аргона. Формирование бездефектных соединений возможно в широком диапазоне параметров режимов сварки, что затрудняет выбор конкретных режимов СТП для заготовок определенной толщины.

Выводы:

1. Сварка трением с перемешиванием является инновационной технологией получения неразъемных соединений в твердом состоянии с высокими значениями прочности и других эксплуатационных показателей сварных конструкций.

2. Более широкому применению сварки трением с перемешиванием в производстве сварных конструкций из легких сплавов способствует их относительно невысокая температура плавления, упрощающая создание рабочих инструментов с высокой стойкостью.

3. Необходимо развивать и стандартизировать методы испытаний конструкционных материалов и, прежде всего, легких сплавов для оценки их свариваемости трением с перемешиванием.

Список источников

1. Антипов В. В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 157–167.

2. Rudrapati Ramesh. Recent advances in joining of aluminum alloys by using friction stir welding // *Mass production processes / edited by Anil Akdogan and Ali Serdar Vanli. IntechOpen, 2020. 13 p. DOI: 10.5772/intechopen.89382*

3. Терентьев С. А., Арзыев Т. Р. Сварка трением с перемешиванием деталей из технического алюминия // *Вестник ПНИПУ. 2012. С. 46–49.*

4. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution / A. Heidarzadeh [et al.] // *Progress in materials science. 2021. Vol. 117 (100752). 68 p. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100752*

5. Friction stir welding of aluminum in the aerospace industry: The current progress and state-of-the-art review / M. M. Z. Ahmed, M. M. El-Sayed Seleman, D. Fydrych, G. Çam // *Materials. 2023. № 16 (2971). 33 p. DOI: 10.3390/ma16082971*

6. Курицын Д. Н. Разработка технологического обеспечения сварки трением с перемешиванием в производстве аэрокосмических конструкций : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 177 с.

7. Бойцов А. Г., Качко В. В., Курицын Д. Н. Высокоскоростная сварка трением перемешиванием авиационных материалов и конструкций // *Металлообработка. 2013. № 5–6 (77–78). С. 35–42.*

8. Влияние режима сварки трением с перемешиванием и ее направления относительно направления прокатки сплава Д16 на структуру и свойства его сварных соединений / А. Н. Иванов [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 4. С. 110–123. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-110-123*

9. Иванов А. Н. Разработка способа и оборудования сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием для получения прочных сварных соединений из алюминиевого сплава Д16 : дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2019. 188 с.

10. Особенности процессов структурообразования в соединениях сплава Д16, полученных сваркой трением с перемешиванием с инструментом типа bobbin tool / А. Н. Иванов [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23. № 2. С. 98–115. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-98-115*

11. Структура и механические свойства горячекатаных листов из сплава Al — 2 %, Cu — 2 %, Mn — 0,4 %, Si — 0,2 %, Zr, подвергнутых сварке трением с перемешиванием / Н. А. Белов, К. А. Цыденов, Н. В. Летагин, С. О. Черкасов // *Цветные металлы. 2022. № 5. DOI: 10.17580/tsm.2022.05.09*

12. Овчинников В. В., Дриц А. М. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием соединений алюминиевых сплавов системы Al–Mg // *Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 3. С. 7–20.*

13. Овчинников В. В. Перспективы развития высокотехнологичных деформируемых алюминиевых сплавов для сварных конструкций. Часть 1 // *Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 2. С. 24–38.*

14. Овчинников В. В. Перспективы развития высокотехнологичных деформируемых алюминиевых сплавов для сварных конструкций. Часть 3 // *Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 4. С. 44–60.*

15. Дриц А. М., Овчинников В. В., Резцов Р. Б. Дефекты, возникающие при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов системы Al–Mg, и способы их устранения // *Технология легких сплавов. 2022. № 4. С. 14–25.*

16. Конюхов А. Д., Дриц А. М., Шуртаков А. К. Свойства сплава 1565чМ и его сварных соединений // *Технология легких сплавов. 2013. № 3. С. 113–120.*

17. Polmear I. J. *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals. Light alloys. 4th ed. Oxford ; Burlington, MA : Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006. 421 p.*

18. Оптимизация механических характеристик сварных соединений, выполненных СТП, с использованием современных вычислительных систем / М. М. Бакрадзе [и др.] // *Труды ВИАМ. 2019. № 4 (76). С. 11–20.*

19. Пантелеев М. Д. Особенности формирования структуры сварных соединений при сварке трением с перемешиванием высокопрочных алюминий-литиевых сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 23 с.

20. Свойства сварных соединений литейного алюминиевого сплава ВАЛ10, полученных сваркой плавлением и трением с перемешиванием / Л. П. Андреева, В. В. Овчинников, В. К. Кабанцев, С. Д. Каптухина // *Современные материалы, техника и технологии*. 2019. № 1 (22). С. 76–85.
21. Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Федорчук В. Е. Сварка трением с перемешиванием композиционных, гранулированных и квазикристаллических алюминиевых сплавов // *Автоматическая сварка*. 2011. № 7. С. 3–8.
22. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов различных систем легирования / А. Г. Покляцкий, А. А. Чайка, И. Н. Клочков, М. Р. Яворская // *Автом. сварка*. 2010. № 10 (690). С. 18–23.
23. Дриц А. М., Овчинников В. В. Свойства соединений листов алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. № 10. С. 7–15.
24. Волкова Е. Ф. Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния (обзор) // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 11. С. 5–9.
25. Мостяев И. В., Акинина М. В. Особенности и тенденции развития в области термической обработки магниевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 7 (67). С. 41–48.
26. Бондарев А. А., Нестеренков В. М. Технологические особенности сварки деформируемых магниевых сплавов электронным лучом в вакууме // *Автоматическая сварка*. 2014. № 3. С. 18–22.
27. Friction stir welding/processing of mg-based alloys: A critical review on advancements and challenges / F. Badkoobeh [et al.] // *Materials*. 2021. № 14 (6726) 35 p. DOI: 10.3390/ma14216726
28. A comprehensive review of friction stir techniques in structural materials and alloys: challenges and trends / D. A. P. Prabhakar [et al.] // *Journal of materials research and technology*. 2022. № 20. P. 3025–3060.
29. Селиванов А. С., Бачаев Д. А. Влияние режимов сварки трением с перемешиванием и параметров инструмента на механические и структурные свойства сварных соединений титановых сплавов // *Инновационное и цифровое машиностроение : материалы Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение», Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства России»*. Уфа : УГАТУ, 2021. С. 351–357. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=udrytm>.

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

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

Статья поступила в редакцию 27.11.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Денисова Наталья Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

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

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

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

ENSURING THE MACHINABILITY OF STRUCTURES DURING FRICTION STIR WELDING AT THE MATERIAL SELECTION STAGE. PART 2: WELDABILITY OF LIGHT ALLOYS

The article systematizes the problem state of weldability of light alloys by friction stir welding and prospects for its further development. Classification of aluminum alloys and assessment of their weldability are studied. Weldability of aluminium alloys is one of the most studied problems, as is the general problem of getting fixed joints between them. The article describes possibilities of obtaining the joints between aluminum alloys of different alloying systems by friction stir welding. Prospects of using magnesium alloys are shown and their weldability is estimated. Features of application and welding of titanium alloys with evaluation of their weldability are considered.

Key words: tool, welding condition, alloying system, weldability, fusion welding, friction stir welding, machinability of welded structures.

References

1. Antipov V. V. Development strategy for titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys [Strategiya razvitiya titanovykh, magnievykh, berillievyyh i alyuminiyevyyh splavov]. *Aviation Materials and Technologies*. 2012. No. 5. Pp. 157–167. (rus)
2. Ramesh Rudrapati. Recent advances in joining of aluminum alloys by using friction stir welding. *Mass production processes*, ed. by Anil Akdogan and Ali Serdar Vanli. IntechOpen. 2020. 13 p. DOI: 10.5772/intechopen.89382
3. Terent'ev S. A., Arzyev T. R. Friction stir welding of technical aluminum parts [Svarka treniem s peremeshivaniem detalej iz tekhnicheskogo alyuminiya]. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2012. Pp. 46–49 (rus)
4. Heidarzadeh A. [et al.] Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. *Progress in Materials Science*. 2021. No. 117 (100752). 68 p. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100752
5. Ahmed M. M. Z., El-Sayed Seleman M. M., Fydrych D., Çam G. Friction stir welding of aluminum in the aerospace industry: The current progress and state-of-the-art review. *Materials*. 2023. No. 16 (2971). 33 p. DOI: 10.3390/ma16082971
6. Kuricyn D. N. Development of technological support of friction stir welding in the production of aerospace structures: thesis of PhD in Engineering [Razrabotka tekhnologicheskogo obespecheniya svarki treniem s peremeshivaniem v proizvodstve aerokosmicheskikh konstrukcij: dis. ... kand. tekhn. nauk]. M., 2018. 177 p. (rus)
7. Bojcov A. G., Kachko V. V., Kuricyn D. N. High speed friction stir welding aviation materials and structures [Vysokoskorostnaya svarka treniem peremeshivaniem aviacionnykh materialov i konstrukcij]. *Metalloobrabotka*. 2013. No. 5–6 (77–78). Pp. 35–42. (rus)
8. Ivanov A. N. [et al.] Influence of the friction stir welding mode and its direction relative to the direction of rolling the D16 alloy on the structure and properties of its welded joints [Vliyaniye rezhima svarki treniem s peremeshivaniem i ee napravleniya odnositel'no napravleniya prokatki splava D16 na strukturu i svoystva ego svarnykh soedinenij]. *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2020. Vol. 22. No. 4. Pp. 110–123. (rus) DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-110-123
9. Ivanov A. N. Development of method and equipment for the friction stir welding with ultrasonic action to obtain strong welded joints from aluminum D16 alloy: thesis of PhD in Engineering [Razrabotka sposoba i oborudovaniya svarki treniem s peremeshivaniem s ul'trazvukovym vozdeystviem dlya polucheniya prochnykh svarnykh soedinenij iz alyuminiyevogo splava D16: dis. ... kand. tekhn. nauk]. Tomsk, 2019. 188 p. (rus)

10. Ivanov A. N. [et al.] Features of structuring processes in D16 alloy joints obtained by friction stir welding with a tool of “bobbin tool” type [Osobennosti processov strukturoobrazovaniya v soedineniyah splava D16, poluchennykh svarkoj treniem s peremeshivaniem s instrumentom tipa “bobbin tool”]. *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2021. Vol. 23. No. 2. Pp. 98–115. (rus) DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-98-115

11. Belov N. A., Tsidenov K. A., Letyagin N. V., Cherkasov S. O. Structure and mechanical properties of hot-rolled sheets of alloy Al — 2 %, Cu — 2 %, Mn — 0.4 %, Si — 0.2 %, Zr subjected to the friction stir welding [Struktura i mekhanicheskie svoystva goryachekatanykh listov iz splava Al — 2 %, Cu — 2 %, Mn — 0,4 %, Si — 0,2 %, Zr, podvergnutykh svarke treniem s peremeshivaniem]. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 5. (rus) DOI: 10.17580/tsm.2022.05.09

12. Ovchinnikov V. V., Drits A. M. Technological features of friction stir welding joints of aluminum alloys of the Al-Mg system [Tekhnologicheskie osobennosti svarki treniem s peremeshivaniem soedinenij alyuminiyevykh splavov sistemy Al-Mg]. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2019. No. 3. Pp. 7–20. (rus)

13. Ovchinnikov V. V. Prospects of development of high-tech deformable aluminum alloys for welded constructions. Part 1 [Perspektivy razvitiya vysokotekhnologichnykh deformiruemyykh alyuminiyevykh splavov dlya svarnykh konstrukcij. Chast' 1]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*. 2017. No. 2. Pp. 24–38. (rus)

14. Ovchinnikov V. V. Prospects for developing high-tech deformable aluminum alloys for welded constructions. Part 3. [Perspektivy razvitiya vysokotekhnologichnykh deformiruemyykh alyuminiyevykh splavov dlya svarnykh konstrukcij. Chast' 3]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*. 2017. No. 4. Pp. 44–60. (rus)

15. Drits A. M., Ovchinnikov V. V., Reztsov R. B. Defects arising during friction stir welding of aluminum alloys of the Al-Mg system, and ways to eliminate them [Defekty, vznikayushchie pri svarke treniem s peremeshivaniem alyuminiyevykh splavov sistemy Al-Mg, i sposoby ih ustraneniya]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2022. No. 4. Pp. 14–25. (rus)

16. Konyuhov A. D., Drits A. M., Shurtakov A. K. Properties of alloy 1565hM and its welded joints [Svoystva splava 1565chM i ego svarnykh soedinenij]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2013. No. 3. Pp. 113–120. (rus)

17. Polmear I. J. *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals*. Light alloys. 4th ed. Oxford ; Burlington, MA : Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006. 421 p.

18. Bakradze M. M. [et. al] Optimization of mechanical characteristics of welded joints made by STP using modern computer systems [Optimizatsiya mekhanicheskikh harakteristik svarnykh soedinenij, vypolnennykh STP, s ispol'zovaniem sovremennykh vychislitel'nykh sistem]. *Trudy VIAM*. 2019. No. 4 (76). Pp. 11–20. (rus)

19. Panteleev M. D. Features of forming the structure of welded joints during friction stir welding of high-strength aluminum-lithium alloys: synopsis of a thesis of PhD in Engineering [Optimizatsiya mekhanicheskikh harakteristik svarnykh soedinenij, vypolnennykh STP, s ispol'zovaniem sovremennykh vychislitel'nykh sistem: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk]. M., 2019. 23 p. (rus)

20. Andreeva L. P., Ovchinnikov V. V., Kabancev V. K., Kappuhina S. D. Melting and friction stir welding properties of VAL10 aluminum alloy foundry joints [Svoystva svarnykh soedinenij litejnogo alyuminiyevogo splava VAL10, poluchennykh svarkoj plavleniem i treniem s peremeshivaniem]. *Modern Innovations, Systems and Technologies*. 2019. No. 1 (22) Pp. 76–85. (rus)

21. Poklyatsky A. G., Ishchenko A. Ya., Fedorchuk V. E. Friction stir welding of composite, granulated and quasi-crystalline aluminum alloys [Svarka treniem s peremeshivaniem kompozitsionnykh, granulirovannykh i kvazikristallicheskiykh alyuminiyevykh splavov]. *Automatic Welding*. 2011. No. 7. Pp. 3–8. (rus)

22. Poklyatsky A. G., Chaika A. A., Klochkov I. N., Yavorskaya M. R. Friction stir welding of aluminum alloys of various alloying systems [Svarka treniem s peremeshivaniem alyuminiyevykh splavov razlichnykh sistem legirovaniya]. *Automatic Welding*. 2010. No. 10 (690). Pp. 18–23. (rus)

23. Drits A. M., Ovchinnikov V. V. Properties of joints of aluminum alloy sheets made by friction stir welding [Svoystva soedinenij listov alyuminiyevykh splavov, vypolnennykh svarkoj treniem s peremeshivaniem]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2015. No. 10. Pp. 7–15. (rus)

24. Volkova E. F. *Modern deformable alloys and magnesium-based composites (overview) [Sovremennye deformiruemye splavy i kompozicionnye materialy na osnove magniya (obzor)]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2006. No. 11. Pp. 5–9. (rus)*
25. Mostyaev I. V., Akinina M. V. *Features and trends of development in the field of thermal treatment of magnesium alloys (overview) [Osobennosti i tendencii razvitiya v oblasti termicheskoy obrabotki magnievykh splavov (obzor)]. Trudy VIAM. 2018. No. 7 (67). Pp. 41–48. (rus)*
26. Bondarev A. A., Nesterenkov V. M. *Technological features of electron beam welding of deformable magnesium alloys in vacuum [Tekhnologicheskie osobennosti svarki deformiruemyykh magnievykh splavov elektronnykh luchom v vakuume]. Automatic Welding. 2014. No. 3. Pp. 18–22. (rus)*
27. Badkoobeh F. [et al.]. *Friction Stir Welding/Processing of Mg-Based Alloys: A Critical Review on Advancements and Challenges / Materials. 2021. No. 14 (6726). 35 p. DOI: 10.3390/ma14216726*
28. Prabhakar D. A. P. [et al.] *A comprehensive review of friction stir techniques in structural materials and alloys: challenges and trends. Journal of materials research and technology. 2022. No. 20. Pp. 3025–3060.*
29. Selivanov A. S., Bachaev D. A. *Influence of friction stir welding modes and tool parameters on mechanical and structural properties of welded joints of titanium alloys [Vliyaniye rezhimov svarki treniem s peremeshivaniem i parametrov instrumenta na mekhanicheskie i strukturnye svoystva svarnykh soedineniy titanovykh splavov]. Innovacionnoe i cifrovoe mashinostroenie: materialy Vserossiyskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii “Stankostroenie i cifrovoe mashinostroenie”, Vserossiyskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii “Sostoyaniye i perspektivy razvitiya svarochnogo proizvodstva Rossii”. Ufa : USATU, 2021. Pp. 351–357. (rus) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=udrymm>.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

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

УДК 331.446.4

^{1,*}Сотников А. Л., ²Подлипенская Л. Е., ²Денисова Н. А.

¹Донецкий национальный технический университет,

²Донбасский государственный технический университет

*E-mail: 0713019870@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАВМАТИЗМА НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

Работа посвящена исследованию динамики и структуры травматизма на предприятиях металлургической отрасли в Донецкой Народной Республике для определения взаимосвязи причин травматизма с психофизиологическим состоянием операторов металлургических машин и механизмов.

Ключевые слова: показатели травматизма, причины травматизма, профессиональные заболевания, металлургическая промышленность, металлургические машины и механизмы, психофизиологическое состояние.

Введение. Статистические показатели травматизма на промышленных предприятиях в целом и на металлургических в частности являются отражением не только общей динамики ситуации, связанной с травматизмом, но также взаимосвязи причин травматизма с различными факторами. Наибольший интерес вызывает такой фактор, как психофизиологическое состояние операторов промышленных (металлургических) машин и механизмов, которое фактически обуславливает их работоспособность, утомляемость и ошибаемость во время выполнения своих трудовых обязанностей, ведущие в том числе к травматизму на производстве.

Цель настоящей работы — исследование динамики и структуры травматизма на промышленных (металлургических) предприятиях Донецкой Народной Республики для установления взаимосвязи причин травматизма с психофизиологическим состоянием операторов промышленных (металлургических) машин и механизмов.

Материалы и методы исследования. Анализ выполнен на основе показателей травматизма, несчастных случаев и профессиональной заболеваемости трудящихся промышленных предприятий за последние 5–7 лет по официальным статистическим

материалам Министерства здравоохранения и Министерства труда и социальной политики Донецкой Народной Республики.

Результаты исследований. С 2014 до 2022 г. на территории Донбасса произошли изменения, которые привели к сокращению промышленного производства на 59 % и, как следствие, к сокращению численности трудящихся в результате массового оттока специалистов с промышленных предприятий в другие сферы деятельности, а также миграции в другие страны [1]. Ожидается, что это привело к снижению и показателей травматизма на промышленных предприятиях региона.

По состоянию на 2019 г. в Донецкой Народной Республике официально действовало 1267 промышленных предприятий с 35 тысячами рабочих мест с вредными и тяжелыми условиями труда и общим числом трудящихся 89,5 тысяч [2]. Основную долю в промышленности занимает металлургия и металлообработка — 38 %; энергетика — 26 %; пищевая промышленность — 10 %; коксохимия — 9 %; угольная промышленность — 8 %; химическая промышленность и машиностроение — по 2 % (рис. 1) [3].

На металлургическое производство в 2019 году приходилась третья по величине

МАШИНОСТРОЕНИЕ

доля рабочих мест с вредными и тяжелыми условиями труда (11,6 % или в количественном выражении — 4060 рабочих мест) после здравоохранения (33,6 %) и добывающей промышленности (13,3 %) (рис. 2) [2].

Металлургическое производство характеризуется удельным весом занятых на

работах с вредными и тяжелыми условиями труда, достигающим показателя в 58,0 %, что меньше показателей в добывающей промышленности (76,9 %) и строительстве (62,9 %) и сопоставимо с производством кокса, нефтепродуктов и продуктов нефтепереработки — 55,5 % (рис. 3).

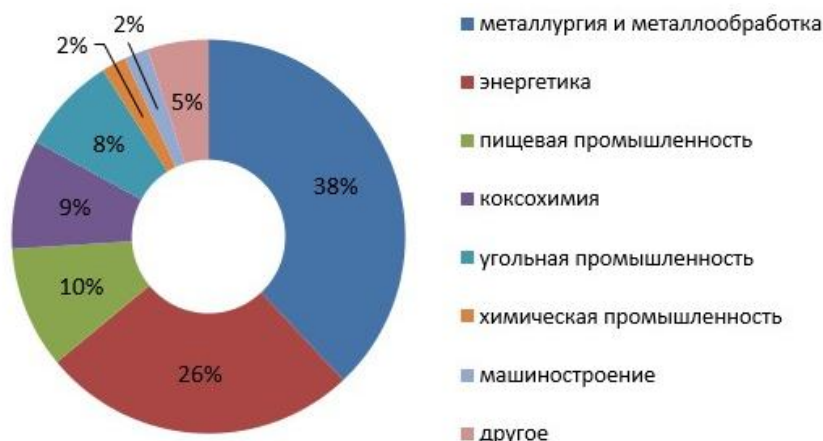


Рисунок 1— Доля промышленных предприятий в Донецкой Народной Республике по отраслям

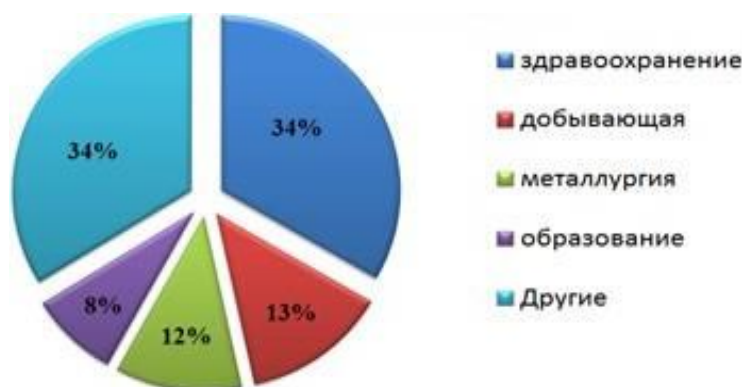


Рисунок 2 — Доля рабочих мест с вредными и тяжелыми условиями труда по отраслям



Рисунок 3 — Вредные и тяжелые условия труда по отраслям

Традиционно в Донецкой Народной Республике наибольшее количество профессиональных заболеваний приходится на трудящихся угольной промышленности основных профессий, имеющих продолжительный стаж работы в контакте с вредными и опасными условиями (табл. 1) [1, 4]. Удельный вес профзаболеваний, установленных трудящимся металлургической промышленности за период с 2018 по 2020 год, снизился в 7 раз, трудящимся прочих отраслей промышленности — примерно в 5 раз.

Причинами развития у трудящихся профессиональных заболеваний является наличие главным образом таких неблагоприятных и вредных производственных факторов при выполнении ими трудовых обязанностей, как [1–3]:

- производственная пыль;
- тяжелый физический труд;
- нахождение работником длительное время в вынужденной позе;
- несовершенство технологии производства и оборудования: низкий уровень механизации, автоматизации и роботизации;
- отсутствие или неиспользование работником средств индивидуальной (коллективной защиты) в процессе производства.

Следует отметить, что эти же факторы оказывают непрерывное каждодневное влияние на психофизиологическое состояние операторов промышленных (металлургических) машин и механизмов, а соответственно, на их работоспособность, утомляемость и ошибаемость во время выполнения своих трудовых обязанностей. По статистическим данным 2019 года, под воздействием превышения предельно допустимого уровня шума, ультразвука, инфразвука находились 26,7 % занятых на работах с вредными и тяжелыми условиями труда, 9,3 % — под воздействием химического фактора, 5,9 % — повышенного уровня вибрации, 22,1 % — повышенной концентрации пыли, преимущественно фиброгенного действия, 3,7 % — повышения или понижения температуры наружного воздуха или атмосферного давления, 12,9 % — в условиях, не удовлетворяющих нормам

микроклимата в помещении, 13,4 % — повышенного уровня тяжести труда, 23,7 % — при напряженности рабочей позы и 23 % — напряженности труда [1, 2].

Кроме физических факторов, на промышленных предприятиях Донецкой Народной Республики отмечаются высокие показатели тяжести и напряженности, нервно-эмоционального напряжения в условиях повышенного риска для здоровья. Причины этого связаны как с физическим износом основных фондов, так и с низким уровнем механизации, автоматизации и роботизации отдельных видов работ и технологических процессов в целом. Кроме этого, в силу оттока специалистов с предприятий, их трудовые обязанности распределяются между оставшимися трудящимся. Повышенный уровень функционального напряжения и перегрузки, как правило, продолжаются длительное время, и, соответственно, кратковременный отдых не приводит к полному восстановлению израсходованных ресурсов, что ведет как к ухудшению психофизиологического состояния операторов промышленных (металлургических) машин и механизмов, так и к развитию патологических изменений, следствием которых является развитие профессиональных заболеваний различной степени тяжести [1–3].

В 2019 г. в Донецком регионе наблюдалась тенденция к снижению роста производственного травматизма по сравнению с 2018 г. на 0,7 %, а уровня травматизма со смертельным исходом — на 20,6 % [5]:

- численность пострадавших на производстве увеличилась на 1,5 %, или на 8 пострадавших, тогда как в 2018 г. по сравнению с 2017 г. численность пострадавших на производстве увеличилась на 2,2 %, или 11 пострадавших (527 против 519 в 2018 г. и 508 в 2017 г.);

- количество несчастных случаев со смертельным исходом снизилось на 20,6 %, или на 7 пострадавших (27 против 34 в 2018 г.).

Уровень травматизма в количественном выражении на 10 тыс. взрослого населения за период с 2016 по 2020 год приведен в таблице 2.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 1

Удельный вес профессиональных заболеваний в Донецкой Народной Республике [4]

Отрасли	Годы				
	2016	2017	2018	2019	2020
Угольная промышленность	98,9	98,4	95,2	98,6	99,1
Металлургическая промышленность	0	0	1,4	0,7	0,2
Другие виды промышленности	1,1	1,6	3,4	0,7	0,7
Все отрасли	100	100	100	100	100

Таблица 2

Уровень травматизма на 10 тыс. взрослого населения в Донецкой Народной Республике [4]

Травматизм	Годы				
	2016	2017	2018	2019	2020
Все случаи травматизма	219,3	211,8	211,5	210,6	193,0
Производственный травматизм	2,9	2,9	2,4	3,1	2,6

В металлургической промышленности и здравоохранении, занимающих следующую позицию после добывающей отрасли (57,8 % — количество случаев производственного травматизма от общего числа), и доля которых из общего числа пострадавших составляет в совокупности 9 % (по 4,5 %), падение уровня травматизма составляет 20 и 29 % соответственно.

Наиболее распространенными видами несчастных случаев, происшедших в 2019 г., являются [5] (рис. 4):

- падение пострадавшего с высоты (30,7 % — 162 пострадавших);
- падения, обрушения, обвалы предметов, материалов, породы, грунта (30,2 % — 159 пострадавших);

– воздействие движущихся, разлетающихся, вращающихся предметов, деталей, машин и механизмов (11,2 % — 59 пострадавших);

– транспортные происшествия (15,1 %).

В общей структуре причин несчастных случаев на производстве, происшедших в 2019 г. 70,4 % несчастных случаев (371 пострадавший) обусловлены [5]:

- причинами организационного характера, психофизиологические причины составляют 18,4 % (97 пострадавших);
- технологические и технические (техногенные) факторы послужили причинами 11,2 % несчастных случаев.

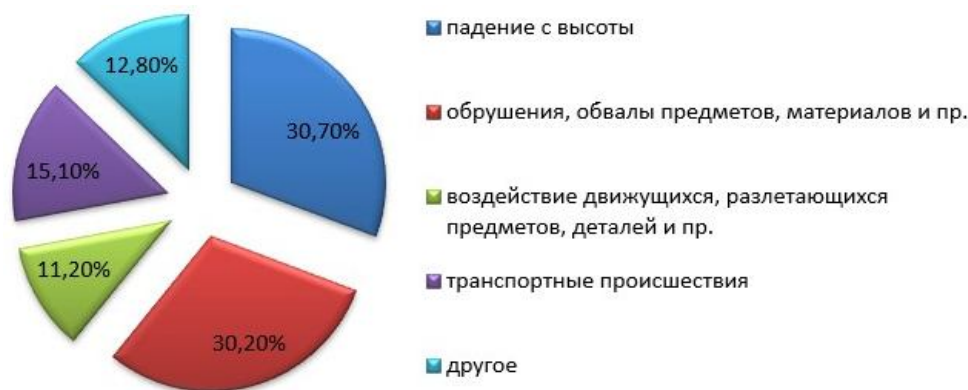


Рисунок 4 — Доля основных видов несчастных случаев за 2019 год в Донецкой Народной Республике

Очевидно, что традиционные меры предупреждения несчастных случаев на производстве не могут в полной мере решить проблему. В данном случае к традиционным мерам следует отнести систему охраны труда, зарегулированную большим количеством нормативных документов, положений, инструкций и правил.

Разработка и внедрение на промышленных предприятиях различных систем непосредственного мониторинга в режиме реального времени вышеуказанных причин позволит предупредить большую часть несчастных случаев на производстве. Это должны быть системы мониторинга технического состояния промышленных машин и механизмов [6], системы мониторинга условий труда и работы (контроля уровня загрязненности воздуха, наличия средств индивидуальной защиты, местоположения работника и т. д.) [7], а также психофизиологического состояния (работоспособности, утомляемости и ошибаемости) операторов машин и механизмов [8].

Список источников

1. *Профессиональная заболеваемость в современных социально-экономических условиях Донбасса [Электронный ресурс] / Г. Г. Онищенко [и др.] // Медицина труда и промышленной экологии. 2022. № 62 (10). С. 630–639. URL: <https://elibrary.ru/loswaf> (дата обращения: 24.11.2023). DOI: 10.31089/1026-9428-2022-62-10-630-639*
2. *Уровень и причины роста профессиональной заболеваемости в ДНР / Министерство труда и социальной политики ДНР // ВКонтакте : социальная сеть : [сайт]. [2023]. URL: https://vk.com/wall-94575357_7674 (дата обращения: 24.11.2023).*
3. *Голоднюк Р. А. Промышленность Донецкой Народной Республики: состояние, тенденции, направления развития // Вестник института экономических исследований. 2020. № 3. С. 37–48.*
4. *О состоянии здоровья населения Донецкой Народной Республики и деятельности учреждений здравоохранения в 2020 году : доклад / М-во здравоохранения ДНР ; сост. В. Я. Федосеев. Донецк : [б. и.], 2021. 216 с.*
5. *О состоянии производственного травматизма в Донецкой Народной Республике [Электронный ресурс] / Донецк Новостной // ВКонтакте : социальная сеть : [сайт]. [2023]. URL: https://vk.com/wall-186440386_18489 (дата обращения: 24.11.2023).*
6. *Вишневский Д. А. Развитие научных основ и практика обеспечения безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов : дис. ... д-ра техн. наук. Донецк : [б. и.], 2021. 250 с.*
7. *Сотников А. Л., Вишневский Д. А., Сахаров Б. А. Контроль температуры работников как фактор промышленной безопасности предприятий и организаций // Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике : сб. науч. тр. 2-й междунар. науч.-техн. конф. Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. С. 181–185.*

Заключение. Наблюдаемое снижение показателей производственного травматизма, в том числе на металлургических предприятиях, в основном связано с сокращением объемов промышленного производства в Донецкой Народной Республике за рассматриваемый период времени. При этом уровень травматизма, например, по количеству случаев на 10 тыс. взрослого населения остается примерно на одном и том же уровне.

Удручающее состояние основных фондов промышленных предприятий и психофизиологическое состояние операторов промышленных (металлургических) машин и механизмов являются основными причинами травматизма вследствие несчастных случаев на производстве.

Наряду с системой охраны труда на промышленных предприятиях должны внедряться системы мониторинга основных причин травматизма на производстве, а именно технического состояния машин и механизмов, условий труда и работы, психофизиологического состояния операторов машин и механизмов.

8. Повышение безопасности труда рабочих металлургических предприятий методами контроля психофизиологических параметров работника в режиме реального времени / Д. А. Вишневский, А. П. Жильцов, А. В. Бочаров, А. Л. Сотников // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 5. С. 53–58. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-53-58

© Сотников А. Л.

© Подлипенская Л. Е., Денисова Н. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Вишневским Д. А., д.т.н., проф., зав. каф. технологии машиностроения и инженерного консалтинга ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А.

Статья поступила в редакцию 12.12.2023

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сотников Алексей Леонидович, д-р техн. наук, профессор каф. механического оборудования заводов черной металлургии им. проф. В. Я. Седуша Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия, e-mail: 0713019870@mail.ru

Подлипенская Лидия Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент каф. экологии и безопасности жизнедеятельности Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Денисова Наталья Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. машин металлургического комплекса Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

***Sotnikov A. L.** (Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia, *e-mail: 0713019870@mail.ru), **Podlipenskaya L. E.**, **Denisova N. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia)

ANALYZING INJURY INDICATORS AT METALLURGICAL ENTERPRISES OF THE DONETSK PEOPLE'S REPUBLIC

The paper is focused on examining the dynamics and structure of injuries at metallurgical enterprises in the Donetsk People's Republic with the intention on determining the interrelation between the causes of injuries and the psychophysiological state of operators of metal machinery and mechanisms.

Key words: injury rates, injury causes, occupational diseases, metallurgical industries, metallurgical machines and mechanisms, psychophysiological state.

References

1. Onishchenko G. G. [et al.] Occupational disease in modern socio-economic conditions of Donbas [Professional'naya zabolevaemost' v sovremennyh social'no-ekonomicheskikh usloviyah Donbassa]. Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology. 2022. No. 62 (10). Pp. 630–639. (rus) URL: <https://elibrary.ru/loswaf> (date of treatment: 24.11.2023). DOI: 10.31089/1026-9428-2022-62-10-630-639

2. Level and causes of the increase of occupational disease in the DPR. Ministry of Labour and Social Policy of the DPR. VKontakte. Social media site. 2023. URL: https://vk.com/wall-94575357_7674 (date of treatment: 24.11.2023).

3. Golodniuk R. A. *The industry of the Donetsk People's Republic: the state, trends, directions of development [Promyshlennost' Doneckoj Narodnoj Respubliki: sostoyanie, tendencii, napravleniya razvitiya]. Vestnik of Institute of Economic Research. 2020. No. 3. Pp. 37–48. (rus)*

4. *On the health status of population of the Donetsk People's Republic and the activities of health institutions in 2020 : report. Ministry of Health of the DPR. Prepared by V. Ya. Fedoseev. Donetsk : [n. p.], 2021. 216 p.*

5. *On the state of industrial injuries in the Donetsk People's Republic. Doneck Novostnoj. VKontakte. Social media site. 2023. URL: https://vk.com/wall-186440386_18489 (date of treatment: 24.11.2023).*

6. Vishnevskiy D. A. *Development of scientific foundations and practice of ensuring the reliable operation of metallurgical machines and mechanisms: thesis of Doctor of Technical Sciences [Razvitie nauchnyh osnov i praktika obespecheniya bezotkaznoj ekspluatacii metallurgicheskikh mashin i mekhanizmov : dis. d-ra tekhn. nauk]. Donetsk : [n. p.], 2021. 250 p. (rus)*

7. Sotnikov A. L., Vishnevskiy D. A., Saharov B. A. *Temperature control of employees as a factor of industrial safety of enterprises and organizations. [Kontrol' temperatury rabotnikov kak faktor promyshlennoj bezopasnosti predpriyatij i organizacij]. Informacionnye tekhnologii v upravlenii, avtomatizacii i mekhatronike : sb. nauch. tr. 2-j mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Kursk : Southwest State University, 2020. Pp. 181–185. (rus)*

8. Vishnevskiy D. A., Zhiltsov A. P., Bocharov A. V., Sotnikov A. L. *Improving the safety of workers in metallurgical enterprises by means of real-time control of psychophysiological parameters of an employee [Povyshenie bezopasnosti truda rabochih metallurgicheskikh predpriyatij metodami kontrolya psihofiziologicheskikh parametrov rabotnika v rezhime real'nogo vremeni]. Occupational Safety in Industry. 2021. No. 5. Pp. 53–58. (rus) DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-53-58*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sotnikov Aleksey Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after professor Sedush V. Ya. Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia, e-mail: 0713019870@mail.ru

Podlipenskaya Lidia Evgenievna, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Ecology and Life Safety Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

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

УДК 621:531:004.942:519.171.2

Пипкин Ю. В., Коцюбинский В. Ю.Донбасский государственный технический университет***E-mail: tmsizam@yandex.ru*

ФРЕЙМ-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К СОСТАВЛЕНИЮ ПОЛЮСНЫХ ГРАФОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

В статье представлен подход к построению полюсных графов с точки зрения теории фреймов. Выделено три уровня фрейм-ориентированного подхода: графический «рамочный», графовый «скелетный» и табличный. На примере фрезерного станочного приспособления показано получение фрейм-образного представления полюсного графа механической системы.

Ключевые слова: фрейм, полюсный граф, механическая система, станочное приспособление.

Проблема моделирования на основе полюсных графов. Полюсные графы являются математическим обобщением эквивалентных схем с сосредоточенными компонентами систем разнообразной физической природы: электрических, гидравлических, механических и других [1]. На основе полюсных графов рекомендуется составлять математические модели технических систем на макроуровне в системах автоматизированного проектирования [2]. Практика разработки математических моделей различных производственных и технологических механизмов показала применимость, методическую ценность и структурированность инструментария полюсных графов. Однако применение математического аппарата полюсных графов не получило широкого распространения. Такую ситуацию можно объяснить отличительной особенностью полюсных графов по сравнению с другими видами графов. Эта особенность заключается в том, что вершины большинства графов обозначают собой объекты системы (переменные и коэффициенты уравнений, детали механизмов и узлов, пункты назначения и пр.), а дуги — связи (или в общем виде — отношения) между этими объектами (для переменных и коэффициентов уравнений — математические действия, для деталей — способ и последовательность их сопряжения, для пунктов назначения — расстояние или время ожидания). У полюсных графов,

наоборот, дуги компонент являются объектами, а вершины — точками сопряжения компонент-объектов (т. е. связями). По существу, полюсный граф объединяет в себе два графа системных переменных: поперечных (их еще называют последовательными, для механических систем это силы) и продольных (их еще называют параллельными, для механических систем это перемещения и скорости) [3]. Еще одной причиной ограниченного применения полюсных графов при построении математических моделей является то, что во многих случаях при исследовании механических систем выполняют переход от эквивалентных схем к записи дифференциальных уравнений [4]. Возникающие при применении полюсных графов трудности можно устранить автоматизацией процесса построения и анализа полюсных графовых моделей.

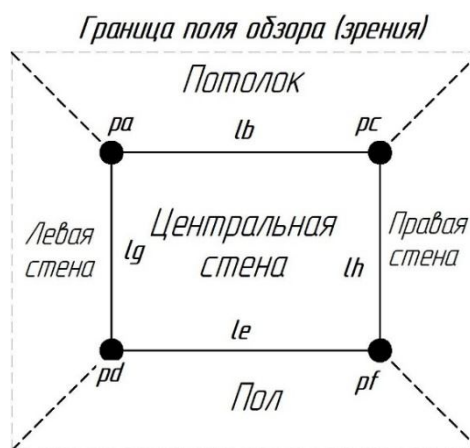
Разработка систем автоматизации процесса построения полюсных графов относится к сфере задач управления знаниями в интеллектуальных системах, так как его основное приложение — построение математических моделей систем, которые отражают знание исследователя о системе и проблемной ситуации. При формировании баз знаний интеллектуальных систем графы находят применение в семантических и фреймовых моделях [5].

Целью данной работы является развитие фрейм-ориентированного подхода

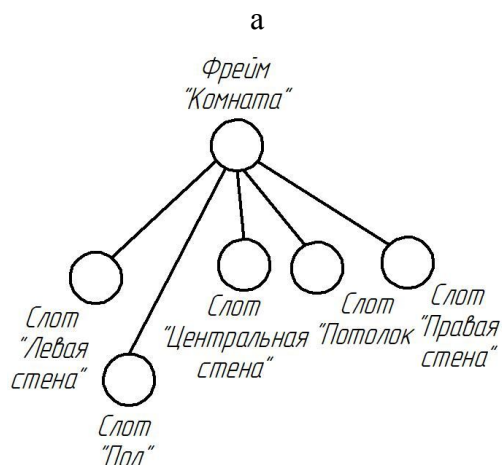
применительно к построению полюсных графовых моделей механических систем, элементы которого были выявлены при составлении таких моделей.

Общие положения о фрейм-ориентированном подходе. Фрейм-ориентированный подход состоит в применении понятия фрейма как «структуры данных для представления стереотипной ситуации», введенного Марвином Минским [6]. По оценке японских специалистов [7], «фреймовая модель, или модель представления знаний, основанная на фреймовой теории М. Минского, представляет собой систематизированную в виде единой теории психологическую модель памяти человека и его сознания». Наиболее часто для объяснения понятия фрейма используют пример образа «Комната» [6, 7]. При этом приводится несколько разных вариантов (рис. 1–3). Наиболее общий подход к описанию «Комнаты» приводится в работе [6] (рис. 1). В пределах границ поля обзора (поля зрения) можно выделить достаточно четкие и в то же время обязательные структурные элементы, взаимосвязи между которыми описываются в виде граф-дерева (рис. 1, б), а записи в базе знаний — таблицей 1.

Таким образом, можно выделить три уровня фрейм-ориентированного подхода: графический «рамочный» (рис. 1, а), графовый «скелетный» (рис. 1, б) и табличный (табл. 1).



pa, pc, pf, pd — точки (points);
lb, lh, le, lg — линии (lines)



б

Рисунок 1 — Образ «комната» и элементы его структуры: а) фрейм как «рамка»; б) фрейм как «скелет» (или «каркас»)

Таблица 1

Запись базы знаний о фрейме «Комната»

Имя фрейма: «Комната»			
Имя слота	Значение слота	Способ получения значения	Дополнительная информация
«Левая стена»	{(pa, pd); (lg)}	Пересечение плоскостей	
«Пол»	{(pd, pf); (le)}	Пересечение плоскостей	
«Потолок»	{(pa, pc); (lb)}	Пересечение плоскостей	
«Центральная стена»	{(pa, pc, pf, pd); (lb, lh, le, lg)}	Пересечение плоскостей	
«Правая стена»	{(pc, pf); (lh)}	Пересечение плоскостей	

Выбор того или иного уровня зависит от формы исходных данных. При моделировании механических систем удобнее всего использовать язык чертежей и рабочих эскизов, т. е. предпочтителен «рамочный» вариант представления фреймов.

Обобщая, можно принять, что фрейм-ориентированный подход заключается в рассмотрении визуальных графических и соответствующих им мыслительных образов в виде рамки, окна (комнаты или оболочки) или любой формы с замкнутыми границами в качестве фрейма знаний с последующим определением его структуры и правил применения.

Полюсный граф механической системы станочного приспособления как фрейм. Станочные приспособления, в соответствии с системой стандартов технологической оснастки (в частности ГОСТ 31.0000.01-90 и ГОСТ 31.010.01-84), представляют собой технологическую оснастку для изготовления деталей машин и механизмов на металлорежущих станках.

Совершенствованию станочных приспособлений уделяется значительное внимание, так как они являются частью технологической системы механической обработки («деталь — инструмент — приспособление — станок» — ДИПС) и оказывают влияние на точность, производительность и себестоимость технологических операций.

При разработке систем автоматизированного проектирования всё многообразие конструкций станочных приспособлений рассматривают как технические системы, которые имеют соответствующие характеристики: связь с окружающей средой, структуру, функцию работы, набор характерных свойств.

Структура конструкции приспособления имеет такой же характер, как и большинство изделий машиностроения. Это многокомпонентная иерархическая структура (рис. 2), которая имеет на самом нижнем уровне геометрические элементы (точки, отрезки, дуги окружностей и др. — элементы рабочих и сборочных чертежей). На более

высоких уровнях — поверхности, группы поверхностей, детали, сборочные единицы, функциональные группы элементов. Кроме логических связей между элементами различных уровней, определяемых структурой рисунка 2, существуют также функциональные связи между элементами одного или разных уровней, которые связывают элементы структуры в конструкцию (Z на рис. 2).

В структуре технической системы станочного приспособления выделяют такие элементы, как: «заготовка (деталь)», «установочные элементы», «зажимные элементы», «зажимной механизм», «привод», «корпус», «направляющие элементы» (рис. 3). Наличие всех элементов, кроме направляющих, является необходимым минимумом для определения станочного приспособления. Важным моментом является то, что для объединения всех элементов в конструкцию требуется наличие силового замыкания.

Для построения полюсного графа выбрана произвольная расчетная схема фрезерного станочного приспособления (рис. 4).

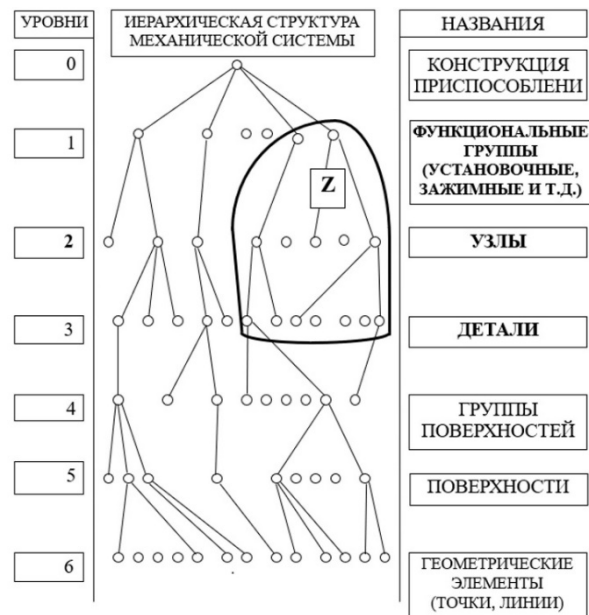


Рисунок 2 — Уровни структурной иерархии машиностроительных конструкций на примере станочных приспособлений

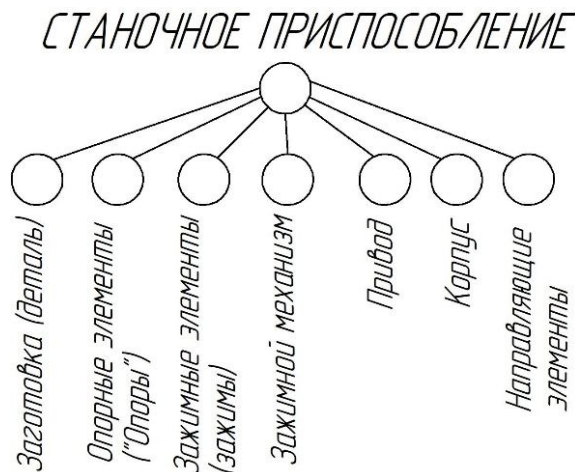
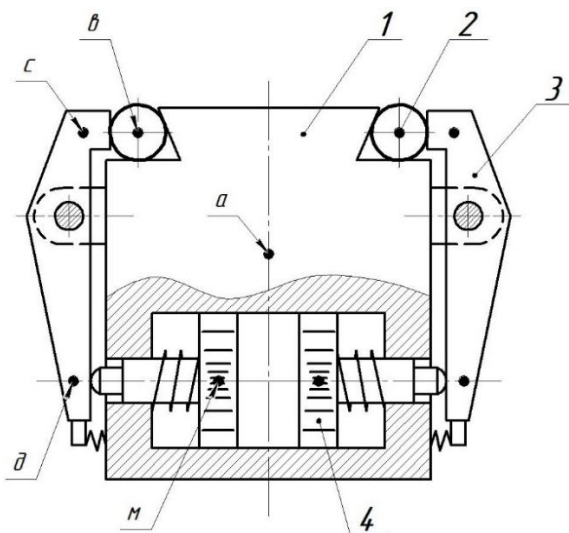


Рисунок 3 — Структура станочного приспособления

Она включает в себя элементы: корпус 1, двуплечие зажимные рычаги 3 (передаточный элемент), установленные на корпусе, двоянный пневмоцилиндр (привод), камера которого выполнена в корпусе и в ней двигаются два штока 4, а также обрабатываемую заготовку 2, устанавливаемую на призмы корпуса (установочные элементы) и прижимаемую к призмам плоской пятой верхнего плеча рычага (зажимной элемент).



1, 2, 3, 4 — номера позиций элементов
а, в, с, д, м — характерные точки

Рисунок 4 — Расчетная схема фрезерного станочного приспособления

В соответствии с рекомендациями [1, 2] выполним построение полюсного графа механической системы в следующей последовательности:

1. Для каждого элемента структуры зададим характерные точки:

- точка *a* — точка корпуса (как точка начала отчета измерений и перемещений);
- точка *b* — точка заготовки (как центр симметрии);
- точка *c* — точка верхнего плеча рычага (так, что направление зажима идет по отрезку *bc*);
- точка *d* — точка нижнего плеча рычага (так, что направление зажима от пневмоцилиндра идет по направлению отрезка *dm*);
- точка *m* — точка поршня пневмоцилиндра (на оси симметрии, т. е. оси перемещения поршня).

2. Для каждой комбинации характерных точек устанавливаем вид взаимодействия элементов системы, отраженных на эквивалентной схеме (рис. 5):

- комбинация точек (*a, b*) — двухполюсник упругости (пружина), упругий контакт заготовки с опорной призмой на корпусе приспособления K_{ba} ;
- комбинация точек (*b, c*) — двухполюсник упругости (пружина), упругий контакт заготовки с зажимным элементом K_{bc} ;
- комбинация точек (*a, m*) — двухполюсник упругости (пружина), пружина для возврата поршня K_{ma} ;
- комбинация точек (*d, m*) — двухполюсник упругости (пружина), упругое взаимодействие через шток и упругий контакт K_{dm} .

3. Для точек приложения и передачи сил в приводе устанавливаем двухполюсники источников энергии: источник силы F_{am} к поршню в точке *m*.

4. Для устройства, преобразующего направление сил, вводим зависимые источники силы F_d (сила зависит от силы в точке *d* и передаточного отношения рычага) и перемещения V_c (перемещение зависит от перемещения в точке *c* и передаточного отношения), т. е. устанавливаем связь гираторного типа между верхней и нижней ветвями модели.

Заменяя компоненты эквивалентной схемы дугами, получаем полюсный граф (рис. 6).

Сравнивая полученный полюсный граф со структурой фрейма на рисунке 2, можем видеть сходство: имеется вершина графа, с которой связаны все другие его вершины. Для полюсного графа такая вершина всегда будет иметь место, так как для анализа и моделирования механических систем с сосредоточенными компонентами она играет роль начала отсчета системы.

Далее можно выполнить обратный переход от «скелетной» структуры фрейма к «рамочной». Для этого вершину a представим в виде рамки — «границы поля зрения» (рис. 7). При этом получаем фрейм-образный вид полюсного графа.

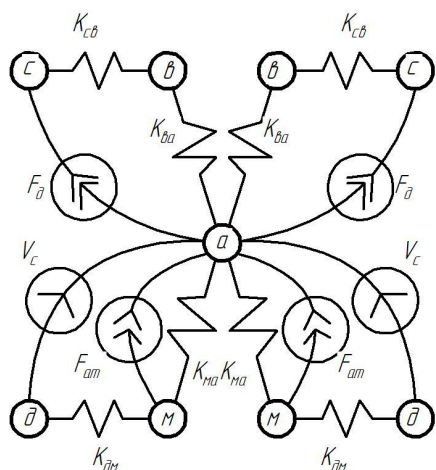


Рисунок 5 — Эквивалентная схема механической системы

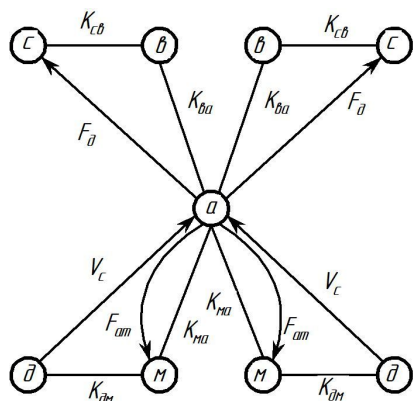


Рисунок 6 — Полюсный граф механической системы

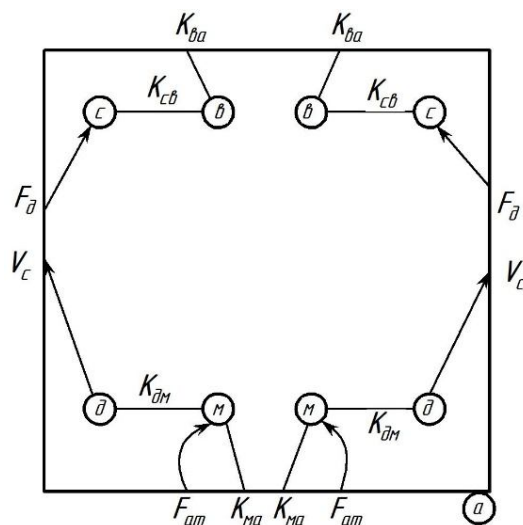


Рисунок 7 — Фрейм-образный вид полюсного графа

Рассматривая фрейм-образный вид полюсного графа можно видеть его особенность — все вершины связаны между собой некоторым путем, т. е. замкнутой последовательностью дуг. Граф с таким видом замыкания называют связным графом. «Скелетная» структура фрейма этого графа должна получиться без замыкания (рис. 8). Слотами фрейма «Полюсный граф» можно определить наличие в «поле зрения» вершин, связанных дугами с границей (началом отсчета) и друг с другом, причем через каждую вершину проходит замкнутый путь. Однако, чтобы граф считать полюсным, кроме связности, необходимо также знание и рассматриваемых переменных — параллельных (продольных) и последовательных (поперечных). Кроме того, по [1, 2] дуги полюсного графа могут представлять пассивные или активные (источники) компоненты системы, т. е. быть пассивными или активными.

Таким образом, «скелетная» структура произвольного полюсного графа (рис. 8) будет отличаться от вида на рисунке 6.

Удобной особенностью фрейм-образного вида полюсного графа (рис. 7) является то, что в свободном поле «границы поля зрения», как бы внутри системы отсчета, можно разместить непосредственно расчетную схему (чертеж, эскиз) (рис. 9).

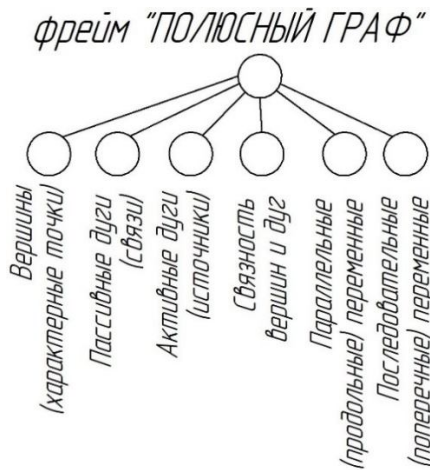


Рисунок 8 — «Скелетная» структура фрейма «Полюсный граф»

Следует отметить, что форма фрейм-образного полюсного графа, совмещенная с эскизом расчетной схемы, соответствует распространенной форме графического интерфейса — оконному интерфейсу. Следовательно, разработка автоматизированной системы построения полюсных графов на основе фрейм-ориентированного подхода соответствует основным тенденциям развития информационных технологий.

Список источников

1. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. К. : Техніка, 1975. 768 с.
2. Трудоношин В. А., Пивоварова Н. В. Системы автоматизированного проектирования в 9-ти кн. Кн. 4. Математические модели технических объектов : учеб. пособ. для вузов / под. ред. И. П. Норенкова. М. : Высшая школа, 1986. 160 с.
3. Ильинский Н. Ф., Цаценкин В. К. Приложение теории графов к задачам электромеханики. М. : Энергия, 1968. 200 с.
4. Пантелеев А. В., Якимова А. С., Босов А. В. Обыкновенные дифференциальные уравнения в примерах и задачах : учеб. пособие. М. : Высшая школа, 2001. 376 с.
5. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб. : Питер, 2000. 384 с.
6. Минский М. Фреймы для представления знаний / пер. с англ. О. Н. Гринбаума ; под ред. Ф. М. Кулакова. М. : Энергия, 1979. 151 с.
7. Представление и использование знаний : пер. с япон. / под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. М. : Мир, 1989. 220 с.

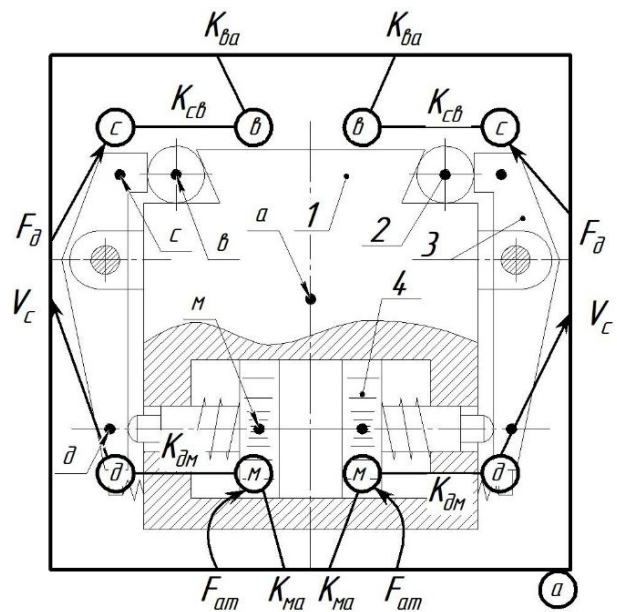


Рисунок 9 — Фрейм-образный полюсный граф с вложенной расчетной схемой

Выводы. Впервые предложен фрейм-ориентированный подход к построению полюсных графов механических систем на примере станочных приспособлений и получена фрейм-образная форма полюсного графа системы.

© Пипкин Ю. В., Коцюбинский В. Ю.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ТМиИК ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А., к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М.

Статья поступила в редакцию 30.11.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пипкин Юрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: tmsizam@yandex.ru

Коцюбинский Виктор Юрьевич, инженер НИЧ
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

***Pipkin Yu. V., Kotsyubinsky V. Yu.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: tmsizam@yandex.ru)

FRAME-ORIENTED APPROACH TO FORMATION POLE GRAPHS OF MECHANICAL SYSTEMS WITH LUMPED COMPONENTS

The article presents an approach to constructing pole graphs from the point of view of frame theory. Three levels of the frame-oriented approach are identified: graphic "framework", graph "skeletal" and tabular. Using the example of a milling workholding fixture, we show how to obtain a frame-shaped representation of the pole graph of a mechanical system.

Key words: frame, pole graph, mechanical system, workholding fixture.

References

1. Sigorskij V. P. *Mathematical apparatus of an engineer [Matematicheskij apparat inzhenera]*. K. : Tekhnika, 1975. 768 p. (rus)
2. Trudonoshin V. A., Pivovarova N. V. *CAD systems in 9 books. Book 4. Mathematical models of technical objects: study letter. for universities. Eds. I. P. Norenkov [Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya v 9-ti kn. Kn. 4. Matematicheskie modeli texnicheskix ob'ektov: ucheb. posob. dlya vuzov]*. M. : Vysshaya shkola, 1986. 160 p. (rus)
3. Il'inskij N. F., Cacenkin V. K. *Applying Graph theory to electromechanical problems [Prilozhenie teorii grafov k zadacham e'lektromexaniki]*. M. : Energiya, 1968. 200 p. (rus)
4. Panteleev A. V., Yakimova A. S., Bosov A. V. *Ordinary differential equations in examples and problems: study letter [Obyknovennyye differencial'nye uravneniya v primerah i zadachah: ucheb. posobie]*. M. : Vysshaya shkola, 2001. 376 p. (rus)
5. Gavrilova T. A., Horoshevskij V. F. *Knowledge bases of intelligent systems [Bazy znaniy intellektual'nyh sistem]*. St. Petersburg : Piter, 2000. 384 p. (rus)
6. Minsky M. *Frameworks for representing knowledge. Translated from English by Greenbaum O. N. Eds. F. M. Kulakova [Frejmy dlya predstavleniya znaniy]*. M. : Energiya, 1979. 151 p. (rus)
7. *Knowledge representation and use. Translated from Japanese. Eds. H. Ueno, M. Isidzuka [Predstavlenie i ispol'zovanie znaniy]*. M. : Mir, 1989. 220 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pipkin Yury Vladimirovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Technologies and Organizations of Mechanical Engineering Production
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia
e-mail: tmsizam@yandex.ru

Kotsyubinsky Viktor Yurievich, engineer of Research Department
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

СТРОИТЕЛЬСТВО

CIVIL ENGINEERING

УДК 624.012

^{1,*}Давиденко А. И., ¹Давиденко А. А., ²Пушко Н. И.

¹Луганский государственный аграрный университет имени К. Е. Ворошилова,

²ООО «Южный горно-металлургический комплекс»

*E-mail: a.davidenko57@yandex.ru

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПЛИТ БЕЗРУЛОННОЙ КРОВЛИ И ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ С ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ СТАЛЬНЫМ ПРОФИЛИРОВАННЫМ НАСТИЛОМ И СТЕРЖНЕВОЙ АРМАТУРОЙ

В статье приведены особенности конструирования и расчетные зависимости определения прочности нормальных сечений ребристых плит перекрытия и безрулонной кровли, армированных стальным профилированным настилом и стержневой арматурой. Приведены зависимости деформационной методики расчета плит с внешним армированием и стержневой арматурой. Для учета развития пластических деформаций в бетоне сжатой зоны принята диаграмма Прандтля. Показано, что введение стержневой арматуры позволяет значительно увеличить прочность плит с внешним армированием, снизить прогиб элемента, увеличить огнестойкость плиты.

Ключевые слова: прочность, бетон, предварительное напряжение, стальной профилированный настил, арматура, плита.

Постановка проблемы. В современном строительстве производственных и гражданских зданий большое значение приобретает повышение качества и надежности плит перекрытий и кровельных покрытий. Состояние технологии устройства кровель в строительстве в целом не удовлетворяет требованиям его индустриализации и качества. Применяемые в строительстве конструкции покрытия многооперационные, трудоемкие, требуют больших затрат. Недостатком безрулонных крыш с ребристыми железобетонными панелями, уложенными ребрами вверх с нащельниками и лотковыми панелями корытообраз-

ного сечения, является сложность изготовления и монтажа, проблемы с гидроизоляцией, требующей, как показывает практика эксплуатации, капитального ремонта рулонными материалами (рис. 1).

Целью работы является разработка конструктивного решения и метода расчета плит с внешним армированием стальным профнастилом и стержневой арматурой.

Материалы и методы исследований. **Объектами исследований** являются плиты перекрытия и плиты безрулонной кровли, армированные стальным профнастилом и стержневой арматурой.



Рисунок 1 — Дефекты безрулонных крыш с ребристыми железобетонными панелями и их ремонт рулонными материалами

Проектирование большепролетных железобетонных элементов с внешним армированием профнастилом связано с использованием в растянутой зоне поперечного сечения ребер плиты дополнительных арматурных стержней. С одной стороны, это соответствует требованиям огнестойкости конструкции плит, с другой — уменьшается расход стали за счет использования арматуры высокой прочности, снижается прогиб элемента, увеличивается изгибная жесткость, устраняется появление трещин, увеличивается срок службы при эксплуатации. Отсутствие нормативных документов по расчету прочности нормальных сечений элементов безрулонной кровли с внешним армированием сдерживает внедрение сталежелезобетонных элементов в практику проектирования. Учитывая, что увеличение пролетов плит с внешним армированием напрямую связано со снижением количества стальных балок настила, материалоемкости конструкций перекрытий, вопросы оценки прочности плит с внешним армированием представляются актуальными.

Оценка напряженно-деформированного состояния сечения элемента основывается на зависимости, связывающей напряжения в сечении, его деформации и действующие усилия. Для учета развития пластических деформаций в бетоне сжатой зоны может быть принята диаграмма Прандтля [1] либо реальная диаграмма деформирования бетона [2]. Использование диаграммы Прандтля в стальном профилированном настиле, в отличие от предпосылок, приведенных в [3], позволяет учитывать его упругопластические свойства, распределяемые по высоте сечения плиты.

Результаты и обсуждение. Наиболее эффективным с точки зрения удельной несущей способности представляется конструктивное решение многопустотной ребристой плиты, образованной размещением пустотообразователей (картонных труб) в пространстве между гофрами профнастила в растянутой зоне (рис. 2).

Предлагаемая конструкция по своим характеристикам приближена к хорошо себя зарекомендовавшей конструкции многопустотной железобетонной панели перекрытия. Вместе с тем отличается значительным снижением трудоемкости изготовления: нет необходимости в специальном оборудовании — пустотообразователях, формах, изготовлении корытообразных сеток и каркасов, постановке поперечной арматуры, роль которой выполняют гофры стального профилированного настила (СПН). Совместная работа СПН и бетона в пролете плиты осуществляется с помощью винтов-саморезов либо арматурных коротышей размером на ширину гофры, которые одновременно выполняют роль фиксаторов пустотообразователей в стальном профилированном настиле при изготовлении плиты. Плита пролетом 6 м после изготовления и распалубки приведена на рисунке 3.

Проведенные испытания предложенных плит перекрытия с внешним армированием показали, что использование в конструкции многопустотной ребристой плиты пустотообразователей представляется рациональным по результатам расчетов прочности и деформативности конструкций, оценке их удельной несущей способности (табл. 1).

Конструкция кровельной плиты безрулонной кровли в стадии изготовления подобна представленной на рисунке 2, с той лишь разницей, что сетка стержневой арматуры имеет рабочие стержни, расположенные в продольном направлении, принимаемые по расчету. Конструкция кровельной плиты безрулонной кровли в стадии эксплуатации приведена на рисунке 4.

Кровельные плиты безрулонной кровли могут быть представлены с пустотообразователями и без них. Нащельники из одиночных гофр профнастила укладываются и закрепляются кровельными саморезами по верхним граням и боковым гофрам на крайних элементах. Таким образом, крайние элементы плит представлены половинами гофр, заполненных бетоном.

СТРОИТЕЛЬСТВО

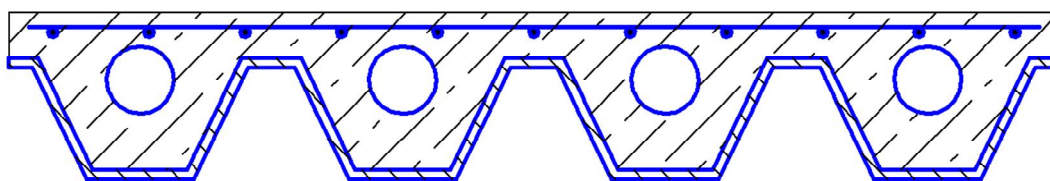


Рисунок 2 — Конструктивное решение плиты перекрытия с внешним армированием



Рисунок 3 — Плита пролетом 6 м после изготовления и распалубки

Показатели эффективности многопустотных ребристых плит, армированных СПН Таблица 1

Серия	Объем бетона, м ³	СПН (арматура) м ² /кг	Собственный вес, кг		Удельная несущая способность М _{max} /l×m
			м	1 м ²	
Многопустотные ребристые плиты L = 6 м	0,535	5,91 / 64,99	975	162,5	1,93
Плиты СКН 90-1000Z (г. Москва) L = 6 м	0,614	7,3 / 57,3	1592	265,4	0,164
Панели железобетонные многопустотные L = 6 м	0,991	- / 115,2	1750	290	0,49

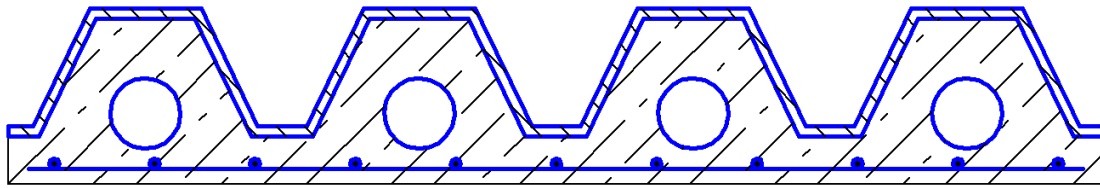


Рисунок 4 — Конструкция кровельной плиты в стадии эксплуатации безрулонной кровли

Ниже приведены основные предпосылки, позволяющие сформулировать расчетные зависимости и выполнить расчет прочности многопустотных ребристых плит безрулонной кровли с внешним армированием и стержневой арматурой:

– расчетное сечение плиты в пролете принимается в виде таврового сечения, приведенного на рисунке 5;

– потеря несущей способности сталебетонного элемента наступает при напряжениях в стальном профилированном настиле и арматуре меньше расчетного сопротивления R_n ;

– эпюра напряжений в стальном профилированном настиле принимается в виде упруго-пластической диаграммы Прандтля;

– эпюра напряжений в сжатой зоне сечения плиты в момент, предшествующий разрушению, принимается в виде трапеции высотой x , имеющей условно-пластическую (x_1) и условно упругую зоны ($x-x_1$); напряжения в условно-пластической зоне равны R_b (рис. 5);

– практически до момента разрушения считается справедливой гипотеза плоских сечений, при которой деформации крайней фибры сжатого бетона полки плиты достигают предельной сжимаемости бетона;

– деформации бетона на уровне границы условно пластической и условно упругой зон вычисляются по формуле

$$\varepsilon_{bel} = \frac{R_b}{E_b},$$

где E_b — начальный модуль упругости бетона.

Принятие эпюры напряжений в виде трапеции не означает наличие идеальных упругих и пластических зон, а является

лишь аппроксимацией реальной криволинейной эпюры распределения напряжений. Использование гипотезы плоских сечений является приближением, позволяющим удовлетворить все условия равновесия, которые дают вполне сопоставимые результаты вычисления несущей способности при сравнении их с опытными значениями.

При определении несущей способности неизвестными являются высота сжатой зоны x , напряжения в профилированном настиле, высота упругой части сжатой зоны x_1 и несущая способность M (рис. 5).

Высота упругой части сжатой зоны может быть получена на основании гипотезы плоских сечений:

$$x_1 = \eta \cdot x, \quad (1)$$

где

$$\eta = \frac{R_b}{E_b \varepsilon_{bu}}. \quad (2)$$

С учетом (1, 2) число неизвестных сводится к двум (высота сжатой зоны x и несущая способность), определяемых из условий равновесия в зависимости от расположения нейтральной оси.

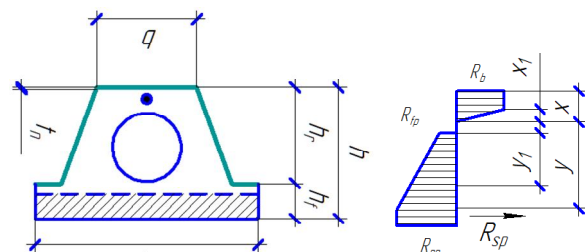


Рисунок 5 — Распределение напряжений в сечении плиты ($x \leq h_f$)

При расположении эпюры напряжений полностью в пределах верхней полки ($x \leq h_f$) (рис. 5) высота сжатой зоны определяется из уравнения (3):

$$\begin{aligned} & \frac{R_b b_f}{2} \chi(2 - \eta) - t_n [R_{fp} \cdot (b_f - b) + \\ & + R_{np} \cdot b + 2 \cdot R_{wel}(x + y - h_f) + \\ & + 2 \cdot R_{wpl} \cdot (h - x - y)] + R_s \cdot A_s = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Проверка прочности сечения выполняется из условия (4):

$$\begin{aligned} M \leq & R_b \cdot b_f \cdot x^2 \frac{2 - \eta + 0,5 \cdot (1 - \eta)^2}{3} + \\ & + t_n [R_{fp} \cdot (b_f - b) \cdot (h_f - x) + R_{np} \cdot b \cdot (h - x) + \\ & + 2 \cdot R_{wel}(x + y - h_f) \cdot (h_f - x + y_1) + \\ & + R_{wpl} \cdot (h - x - y) \cdot (h - x + y)] + \\ & + R_s A_s (h - x - a_{sp}). \end{aligned} \quad (4)$$

В формулах (3) и (4):

– напряжения в верхней полке профнастила:

$$R_{fp} = \frac{E_n \cdot R_b \cdot (h_f - x)}{E_b \cdot (\eta \cdot x)}; \quad (5)$$

– напряжения в нижней полке профнастила:

$$R_{np} = \frac{E_n \cdot R_b \cdot (h - x)}{E_b \cdot (\eta \cdot x)} \leq R_n; \quad (6)$$

– напряжения в стенках профнастила в случае их расположения в упругой зоне:

$$R_{wel} = \frac{R_{fp} + R_{np}}{2}; \quad (7)$$

– напряжения в стенках профнастила, расположенных в пластической зоне:

$$\begin{aligned} & \text{при } (y + x) < h \quad R_{wpl} = R_n; \\ & \text{при } (y + x) > h \quad R_{wpl} = 0; \end{aligned} \quad (8)$$

– вычисление расстояния от верхней полки профнастила до центра тяжести эпюры напряжений в стенке в упругой зоне выполняется по формуле:

$$y_1 = \frac{(x + y - h_f) \cdot (R_{fp} + 2 \cdot R_n)}{3 \cdot (R_{fp} + R_n)}; \quad (9)$$

– с использованием гипотезы плоских сечений определяется расстояние от нейтральной оси до точки излома эпюры напряжений в профнастиле:

$$y = \frac{R_n E_b \eta \cdot x}{E_n R_b}. \quad (10)$$

Приведенные формулы позволяют определить несущую способность плит перекрытия, армированных профнастилом. Для расчета плит покрытия безрулонной кровли профнастил располагается сверху (см. рис. 4). При этом схема распределения напряжений в плите меняется при повороте сечения плиты на 180° . В уравнениях определения высоты сжатой зоны и момента несущей способности добавляется дополнительное слагаемое: усилие в растянутой арматуре, расположенной в полке плиты (формула (3)), и соответствующий статический момент (формула (4)).

Выводы:

1. Приведенные конструктивные решения многопустотной ребристой плиты и плиты безрулонной кровли представляются рациональными по результатам расчетов прочности конструкций, оценке их удельной несущей способности.

2. Приведенные уравнения расчета прочности нормальных сечений ребристых плит, армированных стальным профилированным настилом и стержневой арматурой, наиболее полно отражают напряженно-деформированное состояние конструкции по первой группе предельных состояний и могут быть использованы для расчета конструкций безрулонной кровли.

Список источников

1. Проектирование железобетонных конструкций : справочное пособие / А. Б. Гольшиев [и др.] ; под. ред. А. Б. Гольшиева. К. : Будівельник, 1990. 543 с.
2. Трубчато-ребристая железобетонная плита со стальным профилированным настилом: конструктивное решение и расчет прочности / А. И. Давиденко, М. А. Давиденко, С. Ю. Беляева, Н. В. Присяжнюк // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сборник научных трудов. Одесса, 2005. Ч. 1. С. 62–67.
3. Рекомендации по проектированию монолитных железобетонных перекрытий со стальным профилированным настилом / НИИЖБ, ЦНИИПромизданий. М. : Стройиздат, 1987. 40 с.

© Давиденко А. И., Давиденко А. А.

© Пушко Н. И.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. АДСК ДонГТУ Бондарчуком В. В.,
к.т.н., доц. каф. ПСО ЛГАУ им. К. Е. Ворошилова Скотаренко В. В.

Статья поступила в редакцию 30.11.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Давиденко Александр Иванович, д-р техн. наук, профессор каф. проектирования сельскохозяйственных объектов

Луганский государственный аграрный университет имени К. Е. Ворошилова,
г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: a.davidenko57@yandex.ru

Давиденко Алексей Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. проектирования сельскохозяйственных объектов

Луганский государственный аграрный университет имени К. Е. Ворошилова,
г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия

Пушко Никита Игоревич, начальник бюро коксохимического производства проектно-конструкторского отдела

ООО «Южный горно-металлургический комплекс»,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

***Davidenko A. I., Davidenko A. A.** (Lugansk State Agrarian University named after K. E. Voroshilov, Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: a.davidenko57@yandex.ru), **Pushko N. I.** (ООО "Southern Mining and Metallurgical Enterprise", Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia)

LOAD-BEARING CAPACITY OF NON-ROLL ROOFING PLATES AND FLOOR SLABS, WITH THE EXTERNAL REINFORCEMENT OF STEEL SHEET AND BAR REINFORCEMENT

The article provides features on construction and calculation dependencies for strength determination of normal cross-sections of ribbed plates and non-roll roofing, reinforced with steel sheet and bar reinforcement. The dependencies of the deformation method for calculating plates with the external reinforcing and bar reinforcement were given. The Prandtl diagram is used to account the development of plastic deformations in the compressed zone of concrete. It is shown that the introduction of bar reinforcement allowed to significantly increase the span of plates with the external reinforcement, reduce the bend of the element, increase the fire resistance of a plate.

Key words: strength, concrete, prestressing, steel sheet, reinforcement, plate.

References

1. Golyshev A. B. [et al.] *Design of reinforced concrete structures: a reference manual [Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij: spravochnoe posobie]*. Eds. A. B. Golyshev. K. : Budivel'nik, 1990. 543 p. (rus)
2. Davidenko A. I., Davidenko M. A., Belyaeva S. Yu., Prisyazhnyuk N. V. *Tubular ribbed reinforced concrete plate with steel sheet: design solution and strength calculation [Trubchato-rebristaya zhelezobetonnyaya plita so stal'nym profilirovannym nastilom: konstruktivnoe reshenie i raschet prochnosti]*. *Sovremennye stroitel'nye konstrukcii iz metalla i drevesiny: sbornik nauchnyh trudov*. Odessa. 2005. Part 1. Pp. 62–67. (rus)
3. *Recommendations for the design of monolithic reinforced concrete slabs with steel sheet*. NIIZHB, CNIIPromizdanij. M. : Strojizdat, 1987. 40 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Davidenko Aleksandr Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Objects Design
Lugansk State Agrarian University named after K. E. Voroshilov,
Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: a.davidenko57@yandex.ru

Davidenko Aleksei Aleksandrovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Agricultural Objects Design
Lugansk State Agrarian University named after K. E. Voroshilov,
Lugansk, Lugansk People's Republic, Russia

Pushko Nikita Igorevich, Chief of the Byproduct Coke-making Bureau of the Design and Engineering Department
Southern Mining and Metallurgical Enterprise,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

УДК 624.04

^{1,*}Антошина Т. В., ²Псюк В. В., ²Балашова О. С., ²Псюк М. Ю.

¹Научно-производственный центр «Сваркон»,

²Донбасский государственный технический университет

*E-mail: antava25xx@yandex.ru

УЧЕТ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ НЕСУЩЕГО КАРКАСА ЗДАНИЯ С ОБЛЕГЧЕННОЙ КЛАДКОЙ СТЕН

В данной статье рассматривается вопрос совместной работы несущего каркаса малоэтажного жилого здания с облегченной кладкой стен и её влияние на пространственную устойчивость здания в целом. Рассмотрены основные положения по моделированию совместной работы несущего каркаса с облегченной кладкой стен в ПК «Лира». Выполнен анализ полученных результатов и предложены рекомендации по расчету и учету совместной работы несущего каркаса малоэтажного жилого здания с облегченной кладкой стен.

Ключевые слова: несущий каркас, пространственная устойчивость, армирование балок, стеновое заполнение.

Постановка проблемы и её связь с научными и практическими задачами.

В последние годы происходит увеличение спроса населения на строительство малоэтажных жилых домов по индивидуальным проектам. И на рынке появилось большое количество фирм, предлагающих готовые архитектурно-конструктивные типовые решения. При этом конструктивные решения элементов несущих конструкций принимаются либо на основе примитивных расчетов отдельных элементов конструкций, либо конструктивно. Наиболее часто выполняется только привязка данного типового решения к существующим инженерно-геологическим условиям площадки строительства. Отсутствие на этапе проектирования полноценно выполненного расчета системы «основание — фундамент — здание» не позволяет оценить в полной мере прочность, устойчивость, деформативность и пространственную жесткость несущего каркаса здания. Всё это приводит к появлению дефектов не только в процессе эксплуатации, но и на этапе строительства малоэтажных жилых домов. В дальнейшем это приводит к дополнительным материальным затратам, необходимым для устранения данных дефектов.

При этом практически отсутствует изучение влияния совместной работы каркасов малоэтажных зданий и облегченного стенового заполнения с комбинированной стропильной системой покрытия.

Целью данной работы является оценка влияния стенового заполнения из облегченных материалов на пространственную жесткость несущего каркаса дома, а также оценка совместной работы каркаса дома и облегченного стенового заполнения с комбинированной стропильной системой покрытия.

Цель достигалась решением следующих **задач**:

- создание пространственных моделей здания на основе метода конечных элементов для оценки совместной работы каркаса дома и облегченного стенового заполнения с комбинированной стропильной системой покрытия в ПК «Лира»;

- анализ устойчивости схемы и армирования каркаса дома.

В качестве **объекта исследования** выбрано здание малой этажности индивидуальной застройки — трехэтажный жилой дом (включая мансардный этаж) с цокольным этажом.

Предмет исследования — пространственная жесткость и устойчивость карка-

са дома с учетом упругого основания балок от демпферного слоя стен.

Методика исследования — математическое моделирование малоэтажного здания методом конечных элементов, анализ полученных результатов.

Изложение материала. Стены подземной части дома выполнены из монолитного железобетона, каркас дома выполнен из монолитного железобетона, стены надземной части дома выполнены из газобетонных блоков плотностью D500, покрытие выполнено из мягкой кровли. Для возможности свободной планировки мансардного этажа предусмотрена комбинированная стропильная система, состоящая из основных несущих элементов — металлических колонн, балок и рам, объединенных с деревянными конструкциями лежней, мауэрлатов, затяжек, распорок и стропил.

Конструктивная схема цокольного этажа дома представляет собой схему с частичным каркасом, с несущими стенами в обоих направлениях и центральными колоннами. Пространственная жесткость цокольного этажа обеспечивается непосредственно жесткостью монолитных железобетонных стен в обоих направлениях, а также горизонтальным жестким диском перекрытия на отм. $\pm 0,000$. В качестве горизонтального жесткого диска служит монолитная железобетонная плита перекрытия с ребрами жесткости из балок.

Конструктивная схема надземной части дома — каркасная с заполнением стен из облегченных материалов. Пространственная жесткость надземной части дома обеспечивается жесткостью пространственной каркасной рамы (с работой рам в обоих направлениях за счет жестких узлов стыковки балок с колоннами) с горизонтальными жесткими дисками перекрытий, а также дополнительной жесткостью стен из облегченной кладки и стропильной системы дома. Расчет пространственной схемы малоэтажного жилого дома с учетом влияния грунтовых условий выполнялся в ПК «Лира 9.6». Решению фундаментной части

дома с учетом грунтовых условий будет посвящено отдельное исследование.

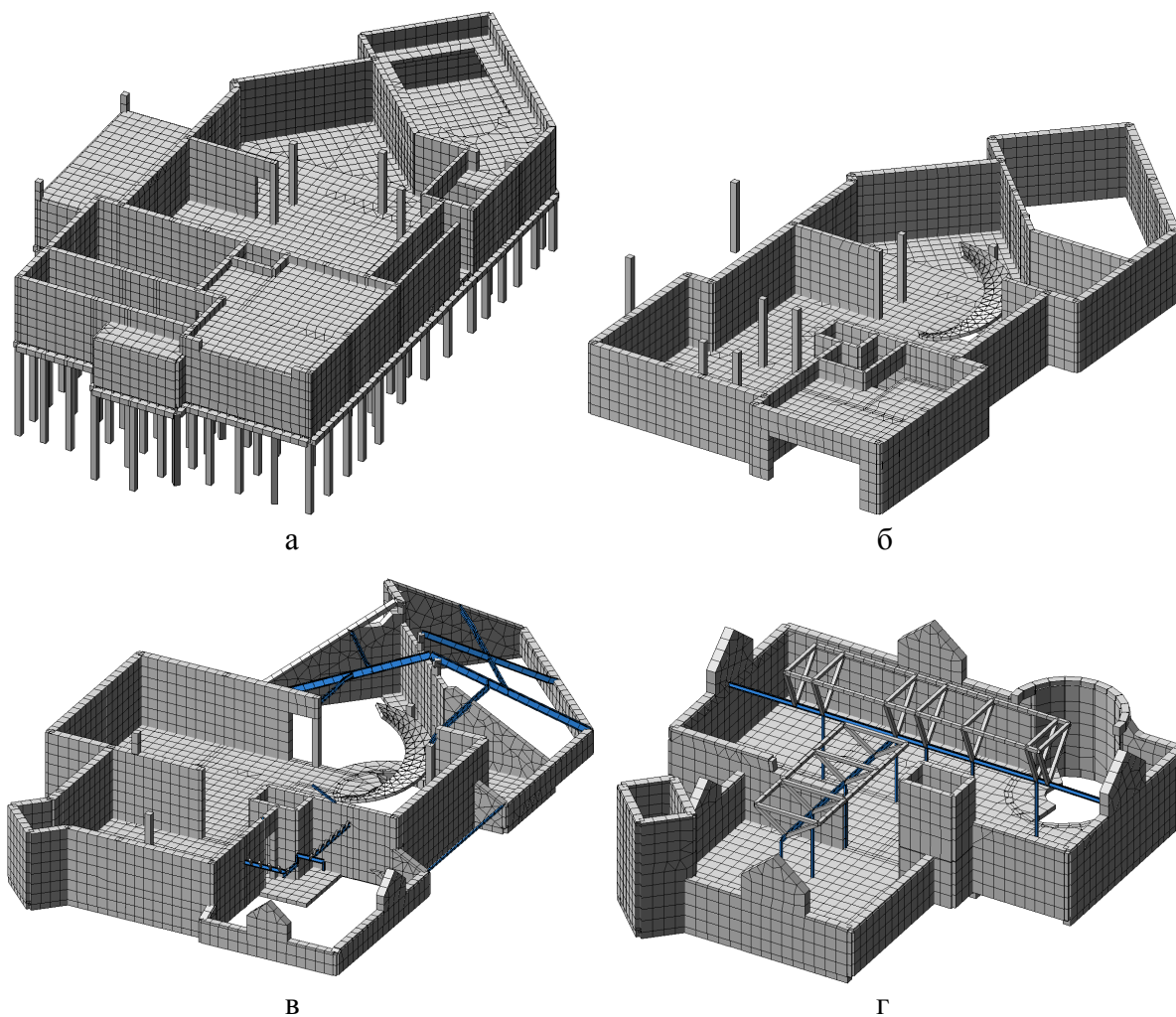
В расчетной схеме элементы стен, перекрытий, лестниц и кровельного покрытия моделировались конечными элементами типа КЭ41, 42 — четырехугольный и треугольный элементы оболочки соответственно; колонны, балки и элементы стропильной системы моделировались стержневыми элементами типа КЭ4 — стержневой элемент фермы и КЭ10 — стержневой элемент общего назначения. Для обеспечения совместной работы стенового заполнения из облегченных материалов с колоннами каркаса дома, а также формирования упругого основания для балок каркаса от демпферного слоя стен применялись элементы типа КЭ55 — элемент упругой связи. Расчетные схемы этажей каркаса дома со стеновым ограждением и основными несущими элементами стропильной системы представлены на рисунках 1 и 2.

При расчете малоэтажного жилого дома задавались следующие нагрузки: собственный вес элементов и боковое давление грунтового основания; снеговая нагрузка; полезная нагрузка и ветровая нагрузка в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [1]. Расчет армирования железобетонных элементов каркаса, стальных и деревянных элементов стропильной системы выполнялся по основным загружениям, учитывающим одновременное воздействие нескольких нагрузок в соответствии с требованиями СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» [2], СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [3] и СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» [4].

Для оценки влияния заполнения стен из облегченных материалов и работы стропильной системы на пространственную жесткость каркаса дома при расчете на устойчивость рассматривалось два варианта расчетных схем: в первом варианте жесткость стен из газоблока и деревянного покрытия со стропилами задавалась единичной; во втором варианте задавались

реальные жесткостные характеристики для газоблока и дерева. В результате расчетов получены следующие показатели устойчи-

вости расчетной схемы: для первого варианта коэффициент запаса устойчивости составил 2,06; для второго — 2,94.



а) цокольный этаж; б) первый этаж; в) второй этаж; г) мансардный этаж

Рисунок 1 — Расчетные схемы этажей дома

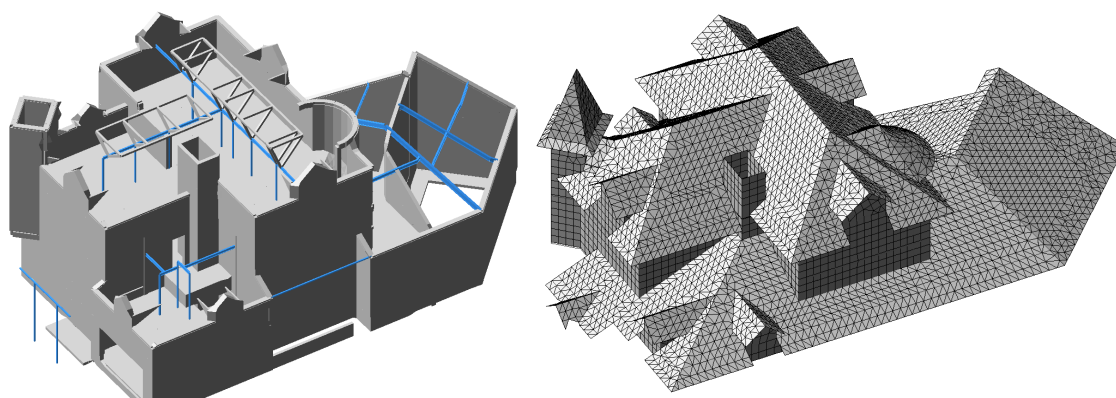


Рисунок 2 — Расчетная схема основных несущих элементов стропильной системы и покрытия

СТРОИТЕЛЬСТВО

Также выполнялся расчет армирования железобетонного каркаса по двум вариантам. Следует отметить, что для первого варианта (работа только железобетонного каркаса) требуемое продольное армирование балок перекрытий было больше, чем для второго варианта с учетом упругого основания балок от демпферного слоя стен. При этом требуе-

мое поперечное армирование в зависимости от вариантов менялось по длине балок, но максимальные значения не менялись.

Расчет армирования железобетонных элементов выполнялся в программе ЛИР-АРМ; результаты расчета продольного армирования балок перекрытия второго этажа для двух вариантов представлены на рисунках 3 и 4.

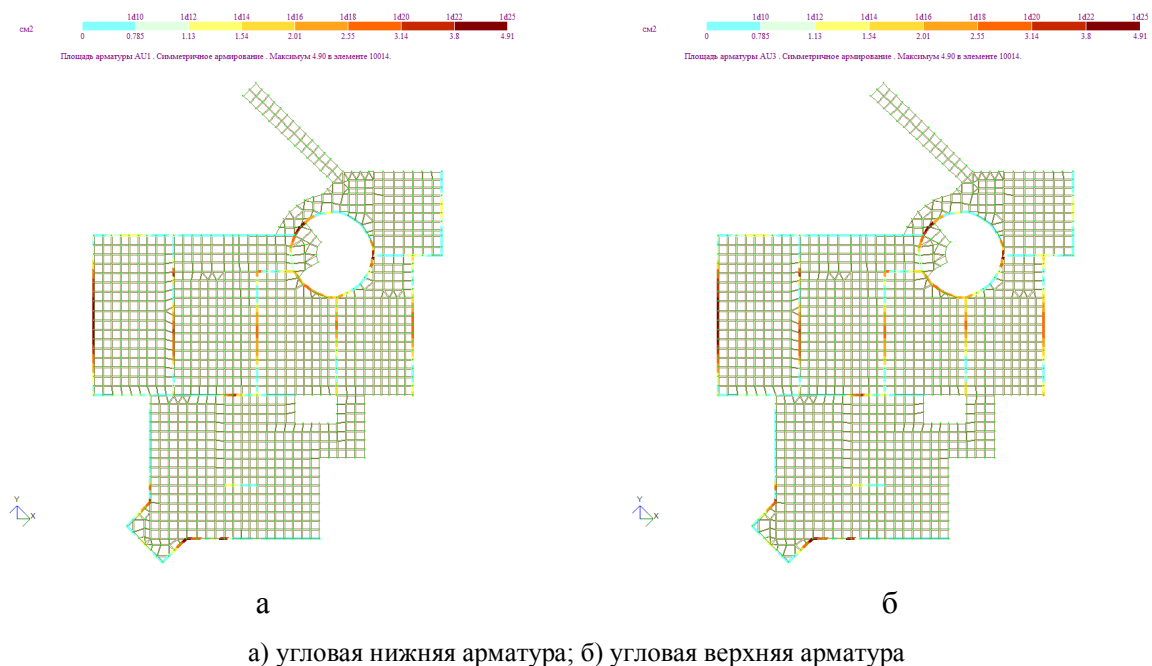


Рисунок 3 — Результаты армирования балок перекрытия с единичной жесткостью облегченных стен

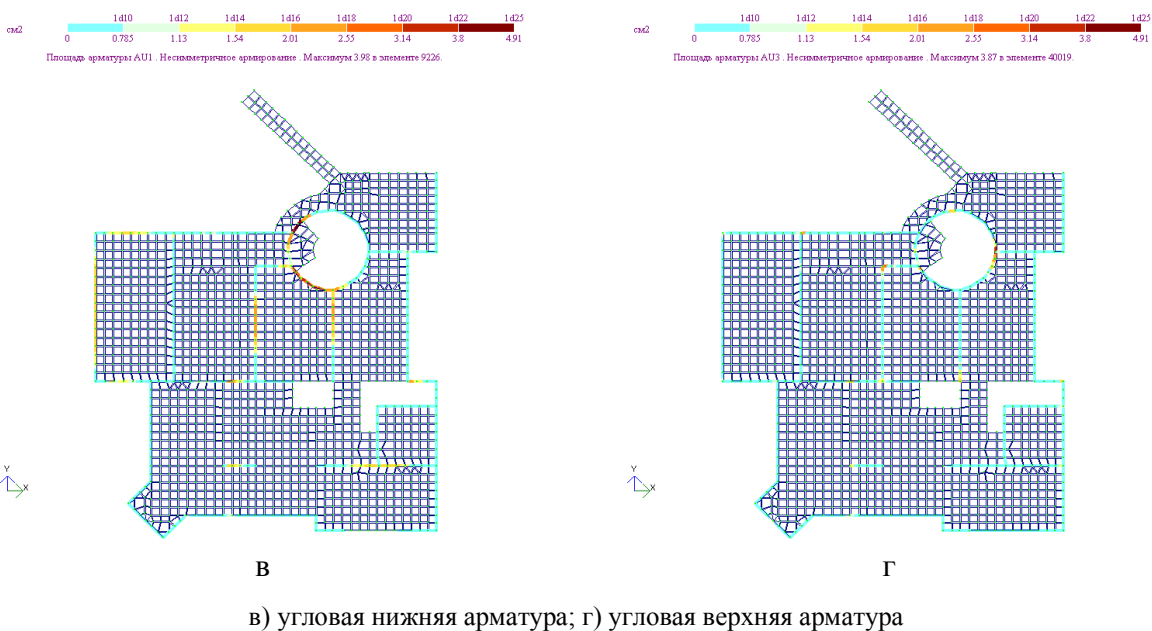


Рисунок 4 — Результаты армирования балок перекрытия с реальной жесткостью облегченных стен

В результате проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. Совместная работа каркаса со стропильной системой и заполнением стен из облегченных материалов повышает пространственную устойчивость здания в целом для данного объекта исследований примерно в 1,5 раза.

2. Для подобных объектов при формировании пространственных расчетных схем для расчета железобетонных каркасов желательнее рассматривать два вариан-

та: работа только несущего каркаса здания и совместная работа каркаса и стенового легкого заполнения.

3. Для свободной планировки мансардных этажей можно применять совмещенную стропильную систему, состоящую из металлического каркаса и деревянных стропил.

4. Предложенная методика расчета с учетом совместной работы несущего каркаса малоэтажных зданий и облегченной кладкой стен позволяет снизить расход арматуры.

Список источников

1. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия : актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М. : ФГУП «Стандартинформ», 2018. 73 с.

2. СП 63.13330.2018. Свод правил. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М. : ФГУП «Стандартинформ», 2019. 119 с.

3. СП 16.13330.2017. Свод правил. Стальные конструкции : актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М. : ФГУП «Стандартинформ», 2017. 145 с.

4. СП 64.13330.2017. Свод правил. Деревянные конструкции : актуализированная редакция СНиП II-25-8. М. : ФГУП «Стандартинформ», 2017. 102 с.

© Антошина Т. В.

© Псюк В. В., Балашова О. С., Псюк М. Ю.

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

Статья поступила в редакцию 06.12.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антошина Татьяна Валентиновна, гл. инженер проекта
Научно-производственный центр «Сваркон»,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: antava25xx@yandex.ru

Псюк Виктор Васильевич, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. промышленного строительства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Балашова Ольга Стефановна, канд. техн. наук, доцент каф. инженерной механики и строительства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Псюк Марина Юрьевна, старший преподаватель каф. промышленного строительства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

***Antoshina T. V.** (Scientific production center “Svarkon”, Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia, *e-mail: antava25xx@yandex.ru), **Psiuk V. V., Balashova O. S., Psiuk M. Yu.** (Donbas State Technical University, Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia)

ACCOUNTING THE JOINT OPERATION OF THE SUPPORTING FRAME OF A LOW-RISE RESIDENTIAL BUILDING WITH HOLLOW WALL MASONRY

This article considers the issue of joint operation of the supporting frame of a low-rise residential building with hollow wall masonry and its impact on the spatial stability of building as a whole. The article considers the basic provisions on modeling the joint operation of the supporting frame with hollow wall masonry in PC «Lyra». The analysis of the obtained results is carried out and recommendations on calculation and account the joint operation of the supporting frame of a low-rise residential building with hollow wall masonry are offered.

Key words: supporting frame, spatial stability, reinforcing of beams, filler-wall.

References

1. SP 20.13330.2016. Code specification. Loads and actions: revised edition SNiP 2.01.07-85*. M. : FGUP “Standartinform”, 2018. 73 p.
2. SP 63.13330.2018. Code specification. SNiP 52-01-2003. Concrete and reinforced concrete constructions. The main provision. M. : FGUP “Standartinform”, 2019. 119 p.
3. SP16.13330.2017. Code specification. Steel constructions: revised edition SNiP II-23-81*. M. : FGUP “Standartinform”, 2017. 145 p.
4. SP 64.13330.2017. Code specification. Wood structures: revised edition SNiP II-25-8. M. : FGUP “Standartinform”, 2017. 102 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Antoshina Tatiana Valentinovna, Project engineer
Scientific production center “Svarkon”,
Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia,
e-mail: antava25xx@yandex.ru

Psiuk Viktor Vasiliyevich, PhD in Engineering, Assistant professor, Head of the Department of Industrial Engineering
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia

Balashova Olga Stephanovna, PhD in Engineering, Assistant professor of the Department of Mechanical Engineering and Civil Engineering
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia

Psiuk Marina Yurievna, Senior lecturer of the Department of Industrial Engineering
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People’s Republic, Russia

УДК 621.878.25

Будзило Е. Е., Гречишкина Е. В., *Псюк М. Ю.
 Донбасский государственный технический университет
 *E-mail: marikapt@rambler.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВОГО БУЛЬДОЗЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С МЕХАНИЗМОМ ЧЕБЫШЕВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Работа направлена на повышение уровня механизации работ. Разработан вариант бульдозерного оборудования с использованием механизма Чебышева, позволяющий повысить его эксплуатационные возможности при производстве обратной засыпки траншей, рекультивационных работах, террасировании откосов земляных сооружений и планировочных работах.

Ключевые слова: шарнирный механизм Чебышева, бульдозерное оборудование, объем призмы волочения, эксплуатационная производительность.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В последнее время в городах РФ первоочередными являются работы по реконструкции городской застройки и строительству жилой зоны на участках, ранее не представляющих интереса с точки зрения проектных решений [1–3]. В основном это связывалось с большой стоимостью освоения данных территорий и большой продолжительностью передвижения населения к местам их трудоустройства в крупных городах [4].

Однако большие темпы развития метрополитена позволили свести эти проблемы на нет на ранее не освоенных территориях. Особенно приоритетным является второе направление строительства, что особенно перспективно при внедрении в массовое строительство для крупных агломераций [4]. Связано это в основном с большой стоимостью земельных участков, что зачастую приводит к развитию жилищного, наиболее приоритетного строительства именно в жилой зоне, вплоть до изменения промышленной зоны со сносом нерентабельных предприятий и нового зонирования с учетом масштабной миграции населения в крупные города Российской Федерации, что наблюдается в настоящее время.

Для преобразования естественного рельефа площадок, отведенных под строительство зданий и сооружений или для благоустройства территорий, выполняются

земляные работы, предусмотренные проектом планировки.

Именно качественное производство данных работ в дальнейшем позволит предусмотреть дорожный водоотвод, а именно: не допустить скапливания воды как внутри площадочного микрорайона, так и на городских магистралях улиц и дорог [5, 6].

Основные работы, включающие строительные земляные процессы по планировке площадки, следующие:

- разработка грунта на участках выемки;
- последующая транспортировка и укладка его с уплотнением в насыпи;
- окончательная планировка площадки и откосов (основная работа) [7].

При этом плотные грунты при необходимости рыхлят. Одновременно необходимо выполнять и вспомогательные работы, включающие оборудование забоя, его передвижение, что особенно актуально при работе в две или три смены.

Способы выполнения ведущих процессов, а именно выемки и транспортирования грунта в главном образе, зависят от объема и сроков выполнения работ, характеристики грунтов, рельефа местности, рабочих отметок площадки, местных и климатических условий. При этом приоритетным является выбор ведущей машины для производства данного вида работ [8].

Планировку площадки в основном в городской среде производят бульдозерами,

скреперами, одноковшовыми экскаваторами и средствами гидромеханизации. Однако бульдозеры являются наиболее приоритетным видом транспорта, так как их применяют для разработки грунта и перемещения его на расстояние до 70 м, а в отдельных случаях при мощности трактора 200 кВт и более — до 150 м, что является наиболее применяемым и используемым в практике производства данных работ.

Для уменьшения потерь грунта при разработке сыпучих грунтов отвалы снабжают боковыми щитками (открылками). К отвалу можно также крепить дополнительное навесное оборудование (откосник) для планировки откосов заложением от 1 до 1:3 и т. д. Данная техника в основном рекомендуется не только для планировочных работ, но также для оформления откосов. В связи с этим *целью* настоящей работы явилась разработка новой конструкции отвала для повышения производительности бульдозеров.

Постановка задачи: разработка нового конструктивного решения отвала бульдозерного оборудования.

Объект исследования — бульдозеры, а именно их отвальное оборудование.

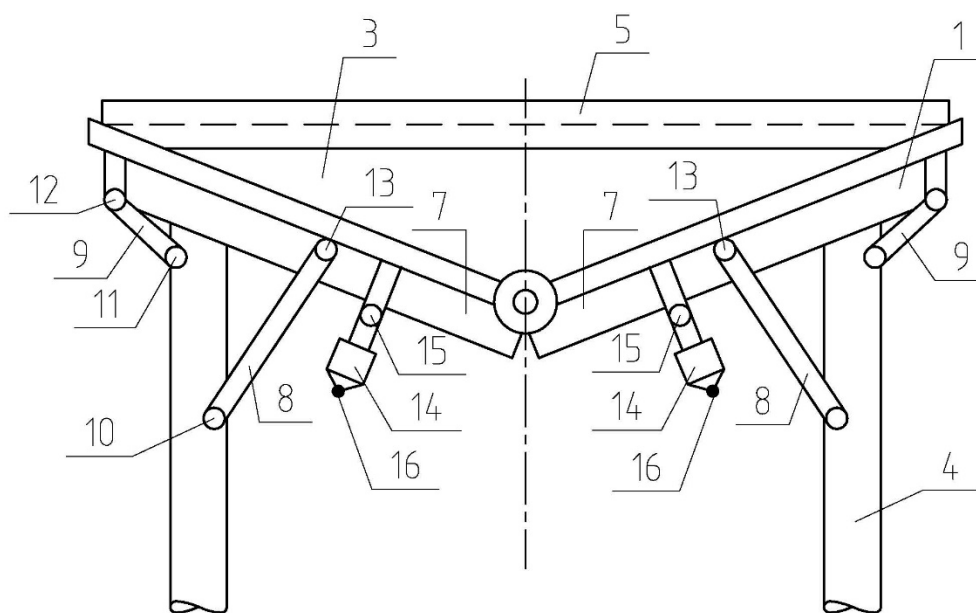
Предмет исследования — площадки, используемые для производства работ по строительству зданий и сооружений, а также для производства работ по обратной засыпке траншей, например, при ремонтных работах, связанных с заменой теплотрасс, водопроводных и канализационных сетей, что довольно актуально в ЛНР, ДНР, Херсонской, Запорожской областях в настоящее время, и работах, связанных с рекультивацией и трассированием откосов земляных сооружений, а именно дорожно-го полотна.

Методика исследования. Совершенствование рабочего процесса разработки грунта, повышение производительности машин, участвующих в данном процессе, во многом является следствием увеличения энергии воздействия на разрушаемую среду. Однако в настоящее время практи-

чески исчерпаны возможности такого увеличения. Существующие машины большой производительности за счет увеличения энергии, реализующие на рабочем органе усилия величиной в несколько сот килоньютон, имеют значительную массу и мощность двигателя; дальнейшее увеличение этих показателей во многих случаях не приводит к росту экономической эффективности таких машин. Поэтому повышение производительности бульдозеров следует искать на пути совершенствования рабочих органов, в замене старых конструкций на более прогрессивные, которые способствуют увеличению объема грунта, разрабатываемого за один рабочий цикл. Сферический отвал является наиболее распространенным в последнее время типом рабочего органа бульдозера. Оборудуется широкими боковыми открылками с наличием на них ножей. Их большая вместимость позволяет перемещать большие объемы грунта на значительные расстояния [9].

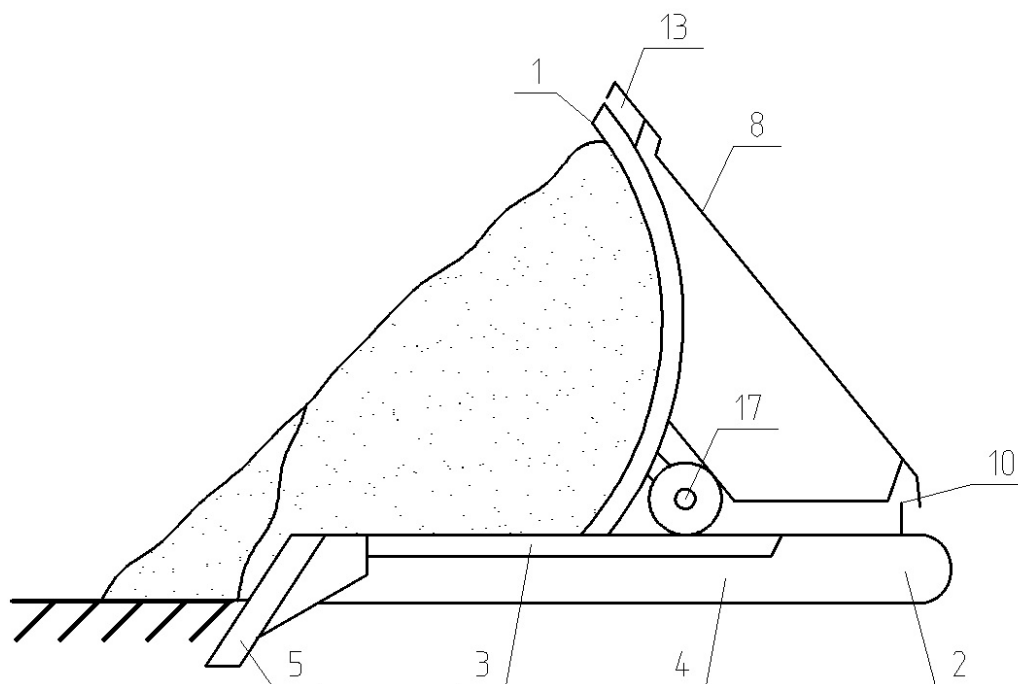
Изложение материала. Законструированное и защищенное авторским свидетельством [10] бульдозерное оборудование сферической формы (рис. 1, 2) с использованием механизма Чебышева включает толкающие брусья, что значительно увеличивает объем транспортируемого грунта. Отвал состоит из верхней отвальной части 1 и нижней части 2 с днищем 3, жестко связанным с толкающими брусьями 4. С днищем 3 также жестко связан режущий нож 5. Верхняя отвальная часть 1 выполнена из равных по длине, соединенных вертикальным шарниром 6 секций 7. Каждая секция 7 своими концевой и средней частями связана с примыкающим к ней толкающим брусом посредством шарнирных тяг 8 и 9, средняя 8 из которых выполнена длиннее концевой 9. Точки 10 и 11 соединения тяг 8 и 9 с толкающим брусом 4 смещены между собой. Шарниры 12 и 13 соединений каждой секции с тягами 8 и 9 и вертикальный шарнир 6 расположены на одной прямой.

СТРОИТЕЛЬСТВО



3 — днище; 4 — толкающие брусья; 5 — режущий нож; 7 — секция; 8 — средняя шарнирная тяга; 9 — концевая шарнирная тяга; 10 — точка соединения средней шарнирной тяги с секцией; 11 — точка соединения средней шарнирной тяги с секцией; 12 — шарнир соединения секции с тягой; 13 — шарнир соединения секции с тягой; 14 — гидроцилиндр управления отвальной части; 15 — кронштейн; 16 — кронштейн

Рисунок 1 — Схема бульдозерного оборудования, вид сверху



1 — верхняя отвальная часть; 2 — нижняя отвальная часть; 3 — днище; 4 — толкающие брусья; 5 — режущий нож; 8 — средняя шарнирная тяга; 10 — точка соединения средней шарнирной тяги с секцией; 13 — шарнир соединения секции с тягой; 17 — опорный ролик

Рисунок 2 — Схема бульдозерного оборудования, вид сбоку

Гидроцилиндры 14 управления выдвижением отвальной части 1 относительно днища 3 соединены с секциями 7 посредством кронштейнов 15 и с днищем 3 посредством кронштейнов 16. Перемещение отвальной части 1 по днищу 3 осуществляется закрепленными на секциях 7 опорными роликами 17. Прямолинейное перемещение вертикального шарнира 6 (рис. 3) вдоль продольной оси оборудования обеспечивается при следующем соотношении звеньев: $AD=1$, $DB=2AD$, $БГ=2,5AD$, $AG=2,5AD$, $ВГ=2,5AD$.

Бульдозерное оборудование работает следующим образом.

В начале рабочего цикла секции 7 выдвинуты вперед и в плане занимают положение, параллельное кромке режущего ножа 5. По мере накопления грунта в процессе его резания гидроцилиндрами 14 управления секции 7 сдвигаются внутрь, при этом отвальная часть 1 принимает в плане V-образную форму. В данном случае основная часть грунта перемещается на днище 3. В конце пути транспортирования грунта вновь включают гидроцилиндры 14, секции 7 выдвигаются вперед и занимают начальное положение, при этом грунт выталкивается с днища 3.

Разработана методика сравнения производительности бульдозерного оборудования традиционной формы с законструированным, которое состоит из верхней по-

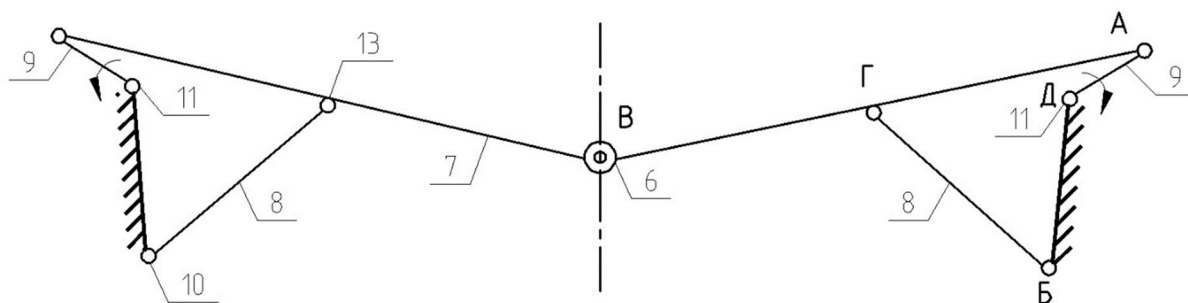
движной отвальной части и нижней части в виде днища с режущим ножом. На рисунке 4 показана схема скапливания грунта на отвале при производстве работ.

Снижение сопротивления копанью на рабочий орган бульдозера с активным отвалом определяется уменьшением вредного влияния пригрузки призмы волочения в результате установки на традиционную раму бульдозера дополнительной площадки и выдвинутого вперед ножа.

Использование принципа перемещения призмы грунта перед подвижным отвалом на площадке вместо волочения призмы грунта по грунту позволило сократить сопротивление копанью, а всю высвободившуюся тяговую мощность использовать на увеличение призмы грунта перед отвалом. Секции подвижной части отвала длиной l имеют шарнирную связь с толкающей рамой и между собой, что налагает ограничения на изменения координат. Аналитически эти ограничения (рис. 5) могут быть записаны в виде уравнений:

$$\begin{aligned} x &= l(\cos \varphi - \cos \psi); \\ y &= 2l(\sin \varphi + \sin \psi); \\ z &= H - \mu l(\cos \varphi - \cos \psi), \end{aligned}$$

где μ — коэффициент наклона верхней плоскости призмы грунта относительно горизонтали.



6 — вертикальный шарнир; 7 — секция; 8 — средняя шарнирная тяга; 9 — концевая шарнирная тяга; 10 — точка соединения средней шарнирной тяги с секцией; 11 — точка соединения средней шарнирной тяги с секцией; 13 — шарнир соединения секции с тягой

Рисунок 3 — Схема шарнирных звеньев отвальной части

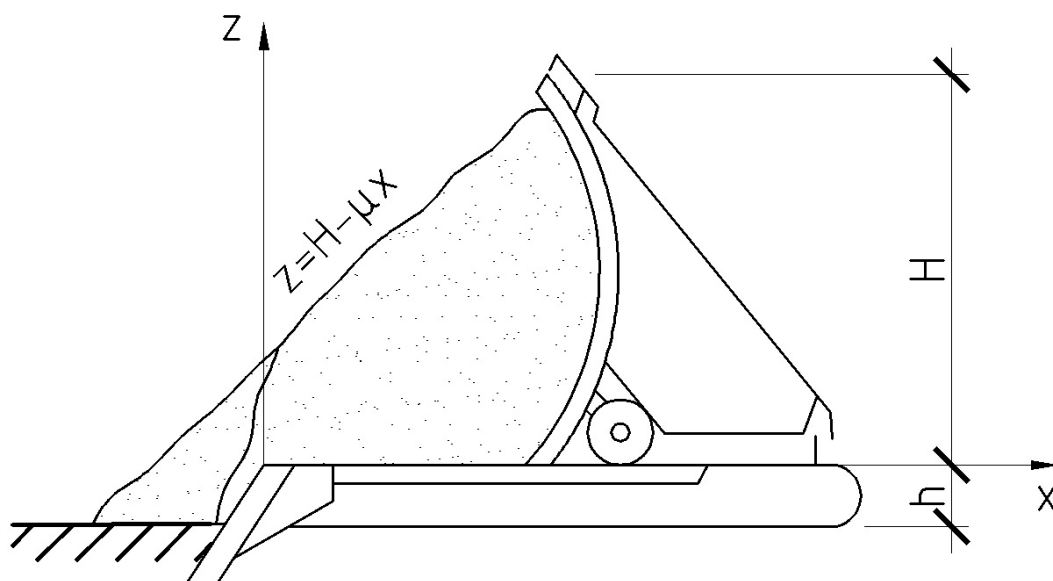


Рисунок 4 — Схема скапливания грунта на новой конструкции отвала

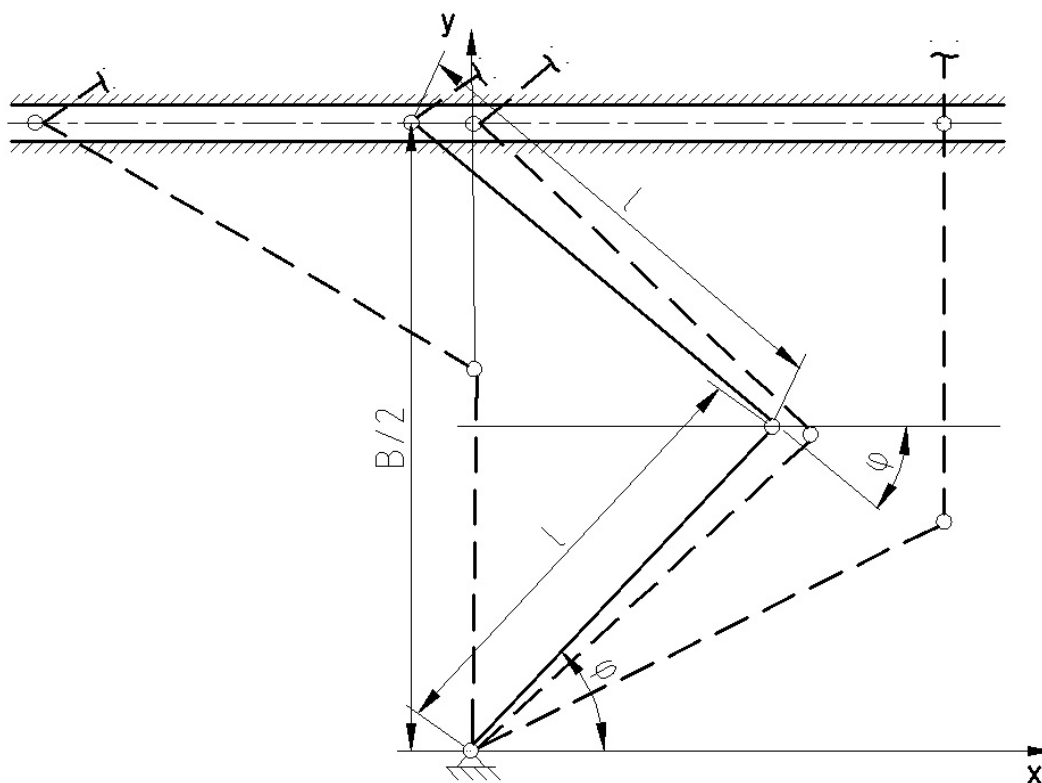


Рисунок 5 — Упрощенная кинематическая схема отвала для определения объема волочения грунта

Геометрическую модель для идеальной призмы грунта можно рассматривать как сумму объемов призмы грунта перед отвалом и призму волочения грунта перед ножом. Расчет эффективности бульдозерного

оборудования с активным отвалом производится на основании баланса тягового усилия машины. Вырезанная стружка грунта в меньшей степени испытывает вредное влияние пригрузки от призмы волочения.

Объем призмы волочения перед ножом выражается через длину ножа B и высоту днища бульдозерного оборудования над уровнем площадки $h + z_0$:

$$q = \frac{B(h + z(x))^2}{2\mu}.$$

Снижение энергии на перемещение грунта достигается увеличением призмы грунта на днище перед отвалом.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Повышение эксплуатационной производительности бульдозерного оборудования достигается за счет жесткого закрепления днища на толкающих брусках, опорных роликов — на отвальной части с возможностью опирания через них отвальной части на днище.

2. Прямолинейное перемещение отвала обеспечивается соотношением звеньев за счет использования механизма Чебышева.

3. Геометрическую модель для идеальной призмы грунта можно рассматривать как сумму объемов призмы грунта перед отвалом и призму волочения грунта перед ножом.

4. Расчет эффективности бульдозерного оборудования с активным отвалом производится на основании баланса тягового усилия машины.

5. Вырезанная стружка грунта в меньшей степени испытывает вредное влияние пригрузки от призмы волочения. Снижение энергии на перемещение грунта достигается увеличением призмы грунта на днище перед отвалом.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку технологии производства работ с использованием данной конструкции отвала.

Список источников

1. Малахов В. В. Гармонизация — системный подход к проектированию зданий и сооружений // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2005. № 3. С. 78–79.
2. Девятаева Г. В. *Технология реконструкции и модернизации зданий*. М. : ИНФРА-М, 2010. 250 с.
3. Ильина О. Н. Критические факторы успеха внедрения современных информационных технологий в проектных организациях // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2003. № 12 (59). С. 42–43.
4. *Реконструкция зданий и сооружений : учеб. пособ. для строит. спец. вузов* / А. Л. Шалагин, В. Ю. Бондаренко, Д. Ф. Гончаренко, В. Б. Гончаров ; под ред. А. Л. Шалагина. М. : Высш. шк., 1991. 352 с.
5. *Автомобильные дороги: безопасность, экологические проблемы, экономика (российско-германский опыт)* / под ред. В. И. Луканина, К.-Х. Ленца. М. : Логос, 2002. 624 с.
6. *Справочная энциклопедия дорожника. Том V : Проектирование автомобильных дорог* / под ред. заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук., проф. Г. А. Федотова и д-ра техн. наук, проф. П. И. Поспелова. М., 2007.
7. Теличенко В. И., Терентьев О. М., Липидус А. А. *Технологии строительных процессов : в 2 ч. Ч. 2 : Учебник для строит. вузов. 2-е изд., испр. и доп.* М. : Высшая школа, 2004. 446 с.
8. Соколов, Г. К. *Технология строительного производства : учеб. пособ. для вузов*. М. : Академия, 2008. 544 с.
9. Сливинский, Е. В. *Модернизация отвалов бульдозеров* // *Строительные и дорожные машины*. 2015. № 1. С. 10–13.
10. *Бульдозерное оборудование : а. с. 1420119 СССР / Г. И. Мозговой, Е. Г. Мозговая, Е. Е. Будзило. ; № 4146372/29-03 ; заявл. 14.11.86 ; опубл. 30.08.88, Бюл. 32. 3 с.*

© Будзило Е. Е., Гречишкина Е. В., Псюк М. Ю.

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

Статья поступила в редакцию 08.12.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Будзило Елена Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент каф. промышленного строительства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

Гречишкина Елена Валериевна, канд. техн. наук, доцент каф. промышленного строительства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

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

Budzilo E. E., Grechishkina E. V., *Psiuk M. Yu. (Donbass State Technical University, Alchevsk,
Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: marikapt@rambler.ru)

USE OF NEW BULLDOZER EQUIPMENT WITH CHEBYSHEV MECHANISM IN CONSTRUCTION

The work is aimed at increasing the level of work mechanization. A variant of bulldozer equipment using the Chebyshev mechanism has been developed, allowing to increase its operational capabilities in the production of backfilling trenches, recultivation work, terracing of slopes of earthworks and planning.

Key words: Chebyshev hinge mechanism, bulldozer attachment, dozing capacity, working capacity.

References

1. Malahov V. V. Harmonization — a systematic approach to the design of buildings and structures [Garmonizaciya — sistemnyj podhod k proektirovaniyu zdaniy i sooruzhenij]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2005. No. 3. Pp. 78–79. (rus)
2. Devyataeva G. V. Technology of reconstruction and modernization of buildings [Tekhnologiya rekonstrukcii i modernizacii zdaniy]. M.: INFRA-M, 2010. 250 p. (rus)
3. Il'ina O. N. Critical factors for the success of the introduction of modern information technologies in project organizations [Kriticheskie faktory uspekha vnedreniya sovremennyh informacionnyh tekhnologij v proektnyh organizacijah]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2003. No. 12 (59). Pp. 42–43. (rus)
4. Shalagin A. L., Bondarenko V. Yu., Goncharenko D. F., Goncharov V. B. Reconstruction of buildings and structures: study letter for build. spec. univer. [Rekonstrukciya zdaniy i sooruzhenij: ucheb. posob. dlya stroit. spec. vuzov]. Eds. Shalagina A. L. M.: Vyssh. shk., 1991. 352 p. (rus)
5. Roads: safety, environmental problems, economy (Russian-German experience) [Avtomobil'nye dorogi: bezopasnost', ekologicheskie problemy, ekonomika (rossijsko-germanskij opyt)]. Eds. Lukanin V. I., Lenc K.-H. M.: Logos, 2002. 624 p. (rus)
6. Reference encyclopedia of the roadman. Volume V : road design [Spravochnaya enciklopediya dorozhnika. Tom V : Proektirovanie avtomobil'nyh dorog]. Eds. Honored worker of science and technology of the RSFSR, Dr. of Techn. Sc. Prof. G. A. Fedotov and Dr. of Techn. Sc. Prof. P. I. Pospelov. M., 2007. (rus)
7. Telichenko V. I., Terent'ev O. M., Lapidus A. A. Building technology processes: in 2 parts. Part 2 : Textbook for build. univer. rev. and. ext. [Tekhnologii stroitel'nyh processov : v 2 ch. Ch. 2 : uchebnik dlya stroit. vuzov. 2-e izd., ispr. i dop]. M.: Vysshaya shkola, 2004. 446 p. (rus)
8. Sokolov G. K. Construction engineering: study letters for univer. [Tekhnologiya stroitel'nogo proizvodstva : ucheb. posob. dlya vuzov]. M.: Akademiya, 2008. 544 p. (rus)

9. Slivinskij E. V. *Modernization of bulldozers' piles [Modernizaciya otvalov bul'dozerov]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2015. No. 1. Pp. 10–13. (rus)*

10. Mozgovoj G I., Mozgovaya E. G., Budzilo E. E. *Bulldozer equipment : a.s. 1420119 USSR ; No. 4146372/29-03 ; submitted 14.11.86 ; published 30.08.88, bulletin No. 32. 3 p.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Budzilo Elena Evgeniïevna, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Industrial Engineering

*Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia*

Grechishkina Elena Valerievna, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Industrial Engineering

*Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia*

Psiuk Marina Yuriiëvna, Senior lecturer of the Department of Industrial Engineering

*Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: marikapt@rambler.ru*

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

<i>Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П.</i> УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ	5
<i>Доценко О. Г., Кизияров О. Л., Аверин Г. А.</i> УСТАНОВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ОБРУШЕННЫХ ПОРОД ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА НА ПОЧВУ ПЛАСТА ВО ВРЕМЕНИ	12

МЕТАЛЛУРГИЯ

<i>Куберский С. В., Крестин Р. В., Саратовский Р. Н., Сервитовский Я. Ю.</i> УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПУЛЬСАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ	21
<i>Чичкан А. А., Денищенко П. Н., Чумак Н. Ю.</i> РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА УГЛОВОГО ПРОФИЛЯ ИЗ ШВЕЛЛЕРНОГО РАСКАТА В УСЛОВИЯХ СТАНА «600» ЮГМК СПОСОБОМ ПРОДОЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ	30

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Еронько С. П., Ошовская Е. В., Денисова Н. А., Петров П. А.</i> РАЗРАБОТКА И МОДЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ	43
<i>Харламов Ю. А., Денисова Н. А., Петров П. А., Орлов А. А.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТАДИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 1: ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ	51
<i>Харламов Ю. А., Денисова Н. А., Петров П. А., Орлов А. А.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА СТАДИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 2: СВАРИВАЕМОСТЬ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ	63
<i>Сотников А. Л., Подлипенская Л. Е., Денисова Н. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАВМАТИЗМА НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ	77
<i>Пипкин Ю. В., Коцюбинский В. Ю.</i> ФРЕЙМ-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К СОСТАВЛЕНИЮ ПОЛЮСНЫХ ГРАФОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ	84

СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Давиденко А. И., Давиденко А. А., Пушко Н. И.</i> НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПЛИТ БЕЗРУЛОННОЙ КРОВЛИ И ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ С ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ СТАЛЬНЫМ ПРОФИЛИРОВАННЫМ НАСТИЛОМ И СТЕРЖНЕВОЙ АРМАТУРОЙ	93
<i>Антошина Т. В., Псюк В. В., Балашова О. С., Псюк М. Ю.</i> УЧЕТ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ НЕСУЩЕГО КАРКАСА ЗДАНИЯ С ОБЛЕГЧЕННОЙ КЛАДКОЙ СТЕН	100
<i>Будзило Е. Е., Гречишкина Е. В., Псюк М. Ю.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВОГО БУЛЬДОЗЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С МЕХАНИЗМОМ ЧЕБЫШЕВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ	106

CONTENT

SUBSURFACE MANAGEMENT

<i>Korneev S. V., Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P.</i> THE SHORT-CUT COMPUTATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS FOR THE TEETH JOINTS OF FABRIC-PLY BELTS	5
<i>Dotsenko O. G., Kiziyarov O. L., Averin G. A.</i> IDENTIFYING THE PRESSURE VARIATION OF GOB ROCKS IN THE WORKED-OUT AREA ON THE LAYER SOIL OVER TIME	12

METALLURGY

<i>Kuberskiy S. V., Krestin R. V., Saratovskiy R. N., Servitovskiy Ya. Yu.</i> IMPROVEMENT OF THE PHYSICAL MODEL OF PULSATION MELT MIXING IN STEEL-POURING LADLE	21
<i>Chichkan A. A., Denishchenko P. N., Chumak N. Yu.</i> DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR PRODUCING THE CHANNEL ROLL ANGULAR PROFILE IN THE CONDITIONS OF THE YuGMK MILL 600 BY THE LONGITUDINAL SEPARATION METHOD	30

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Yeronko S. P., Oshovskaya Ye. V., Denisova N. A., Petrov P. A.</i> DEVELOPMENT AND MODEL TESTING OF POWDER MIXTURES ON LIQUID METAL SURFACES IN AN OXYGEN CONVERTER	43
<i>Kharlamov Yu. A., Denisova N. A., Petrov P. A., Orlov A. A.</i> ENSURING THE MACHINABILITY OF STRUCTURES DURING FRICTION STIR WELDING AT THE MATERIAL SELECTION STAGE. PART 1: GENERAL PRINCIPLES	51
<i>Kharlamov Yu. A., Denisova N. A., Petrov P. A., Orlov A. A.</i> ENSURING THE MACHINABILITY OF STRUCTURES DURING FRICTION STIR WELDING AT THE MATERIAL SELECTION STAGE. PART 2: WELDABILITY OF LIGHT ALLOYS	63
<i>Sotnikov A. L., Podlipenskaya L. E., Denisova N. A.</i> ANALYZING INJURY INDICATORS AT METALLURGICAL ENTERPRISES OF THE DONETSK PEOPLE'S REPUBLIC	77
<i>Pipkin Yu. V., Kotsyubinsky V. Yu.</i> FRAME-ORIENTED APPROACH TO FORMATION POLE GRAPHS OF MECHANICAL SYSTEMS WITH LUMPED COMPONENTS	84

CIVIL ENGINEERING

<i>Davidenko A. I., Davidenko A. A., Pushko N. I.</i> LOAD-BEARING CAPACITY OF NON-ROLL ROOFING PLATES AND FLOOR SLABS, WITH THE EXTERNAL REINFORCEMENT OF STEEL SHEET AND BAR REINFORCEMENT	93
<i>Antoshina T. V., Psiuk V. V., Balashova O. S., Psiuk M. Yu.</i> ACCOUNTING THE JOINT OPERATION OF THE SUPPORTING FRAME OF A LOW-RISE RESIDENTIAL BUILDING WITH HOLLOW WALL MASONRY	100
<i>Budzilo E. E., Grechishkina E. V., Psiuk M. Yu.</i> USE OF NEW BULLDOZER EQUIPMENT WITH CHEBYSHEV MECHANISM IN CONSTRUCTION	106

UDC 622(06) + 669(06) + 621 + 658.58 + 712-1

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

Scientific journal

Issue 2 (76) 2023

**Establisher:
FSEI HE "DonSTU"**

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

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

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

*Recommended by academic council
of FSEI HE "DonSTU"
(Record № 6 dated 27.12.2023)*

Added to scientometrical database of RSCI

Format 60×84¼
Conventional printed sheet 14,38
Order № 1

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

Address of editorial office, publishing and establishing:
FSEI HE "DonSTU"

Lenin avenue, 16, Alchevsk, LPR
294204

e-mail: info@dstu.education
web-site: <http://www.dstu.education>

PUBLISHING AND PRINTING CENTER

room 2113, tel/fax 2-58-59

Certificate of State registration for mass media

publisher, owner and distributor

МИ-СГР ИД 0000055 dated 05.02.2016

Editor-in-chief

Vishnevskiy D. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.,
Rector

Deputy Editor-in-chief

Smekalin E. S. — PhD in Engineering, Asst. Prof.,
Vice-Rector for Science

Editorial board:

Litvinskiy G. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Borshchevskiy S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Korneyev S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Leonov A. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Kharlamov Yu. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Artiukh V. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Vitrenko V. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Asst. Prof.
Snitko S. A. — Doctor of Tech. Sc., Asst. Prof.
Korzun E. L. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Yakovchenko A. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Kuberskiy S. V. — PhD in Engineering, Prof.
Denischenko P. N. — PhD in Engineering, Prof.
Davidenko A. I. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Suleymanova L. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Smolyago G. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Bondarchuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Psiuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Skomskaya S. A. — secretary to the editorial board

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

Issue language:
Russian, English

Computer layout
Ismailova L. M.

© FSEI HE "DonSTU", 2023
© Chernyshova N. V., graphic cover
design, 2023