

ДОНБАССКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



# Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве

*Выпуск 1 (75)*

*Апрель, 2023*



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

Научный журнал  
Выходит 4 раза в год  
Основан в июне 1999 г.  
Выпуск 1 (75) 2023

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

Scientific journal  
Publishing 4 times a year  
Founded in June 1999  
Issue 1 (75) 2023

Алчевск  
2023

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

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

**Научный журнал**

Выпуск 1 (75) 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 №4 от 24.11.2023)*

*Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ*

Формат 60×84½  
Усл. печат. л. 12  
Заказ № 205  
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.

Зинченко А. М. — к.э.н., доц.

Снитко С. А. — д.т.н., доц.

Корзун Е. Л. — д.т.н., проф.

Куберский С. В. — к.т.н., проф.

Должиков В. В. — к.т.н., доц.

Денищенко П. Н. — к.т.н., проф.

Давиденко А. И. — 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 622.831:622.28

*Литвинский Г. Г.*

*Донбасский государственный технический университет*

*E-mail: ligag@ya.ru*

## ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРЕПИ С ГОРНЫМ МАССИВОМ

*Рассмотрены основные деформационно-силовые режимы работы крепи: жесткий и податливый. Даны их обобщенные характеристики в виде функциональной связи определяющих работу крепи геомеханических параметров: несущей способности и смещений периметра. Для суждения о характере сопротивления крепи смещениям предложен коэффициент жесткости крепи, который меняется от 0 для податливой до  $\infty$  для жесткой крепи. Рассмотрены характерные особенности изменения деформационно-силовых показателей крепи во времени. Чтобы оценить суммарное сопротивление крепи внешним воздействиям со стороны массива, введено понятие работоспособности крепи. Показано, что податливая крепь даже легкой конструкции намного превосходит по работоспособности мощные жесткие крепи. Для оценки параметров взаимодействия крепи с горным массивом сравниваются возможные расчетные схемы. Даны рекомендации по выбору расчетных методик горной крепи.*

**Ключевые слова:** *крепь, геомеханические параметры, деформации, несущая способность, деформационно-силовая характеристика, податливость, жесткость, нагрузка на крепь, работоспособность, расчетные схемы.*

### **1 Актуальность и цель исследований**

Добыча большинства сырьевых ресурсов из недр Земли осуществляется подземным и открытым способами, причем совокупный объем добычи превышает 10 млрд т и ежегодно возрастает на 3...5 %. Соответственно, это требует интенсивного сооружения и обустройства подземных горных выработок различного назначения, протяженность которых составляет десятки тысяч километров. На достигнутых глубинах разработки устойчивость различных выработок обеспечивают горные крепи и обделки многочисленного рода конструкций, которые должны вступать в деформационно-силовое взаимодействие с окружающим горным массивом и целенаправленно изменять его поведение для обеспечения эксплуатационной устойчивости породного контура.

Крепи горных выработок в зависимости от своего назначения, технологии возведения и горно-геологических условий применения могут характеризоваться большой совокупностью технико-экономических

показателей, взаимно дополняющих или иногда плохо сопоставимых друг с другом. Описанию истории развития, технических параметров, расчетных методов и экономических показателей горных крепей посвящены многочисленные публикации и монографии, число которых превышает несколько тысяч [1–13 и др.]. Несмотря на это, до сих пор четко не выработан общий подход по классификации и ранжированию таких обобщенных результативных показателей, которые позволяют сопоставить самые разные конструкции крепи с общих позиций, что затрудняет их объективную оценку и обоснованный выбор. Поэтому актуальны исследования, направленные на устранение этих пробелов.

**Целью исследования** является изыскание и формулирование обобщенных показателей, характеризующих особенности взаимодействия крепи и массива горных пород и позволяющих оценить их геомеханическую эффективность.

**Объектом исследований** являются горные крепи подземных горных выработок,

**предмет исследований** — параметры взаимодействия конструкций крепи с массивом горных пород.

Основными **задачами исследований** являются:

- обоснование системы результативных показателей, характеризующих геомеханическое взаимодействие горной крепи с окружающим выработку массивом горных пород;

- раскрытие наиболее характерных зависимостей изменения во времени деформационно-силовых показателей крепи при различных режимах ее работы;

- исследование влияния крепи на геомеханическое поведение массива горных пород вокруг выработки и учет условия контакта крепи с массивом горных пород;

- выявление требований к конструкциям крепи с позиций геомеханики.

## 2 Основные режимы работы и параметры крепи

Наиболее общим показателем горной крепи, отражающим главные особенности ее работы по противодействию проявлениям горного давления, можно считать режим ее деформационно-силового взаимодействия с окружающим выработку массивом горных пород (режим работы).

Для описания режима работы любой крепи в целом, независимо от ее конструктивных особенностей, необходимо знать ее геомеханические параметры в виде деформационно-силовых характеристик.

Геомеханическими параметрами крепи являются её отпор  $q$  (синонимы — несущая способность, реакция крепи) и податливость  $U$  (антоним — жёсткость) конструкции. Отпор крепи  $q$  отражает её силовой, а податливость  $U$  — деформационный показатель взаимодействия с массивом.

Графическое или аналитическое представление связи между грузонесущей способностью  $q$  и податливостью  $U$  крепи называют её **деформационно-силовой характеристикой (ДСХ)**.

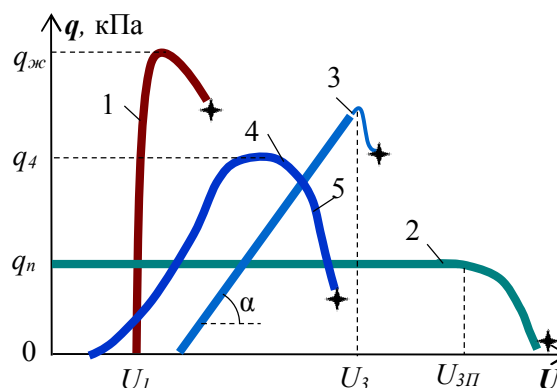


Рисунок 1 — ДСХ крепи с разными режимами работы: 1, 2 — идеально жесткие и податливые; 3, 4 — линейным и нелинейным сопротивлением

С позиций горной геомеханики ДСХ полностью характеризует крепь и избавляет от необходимости рассмотрения особенностей её конструкции. Именно эти характеристики наиболее полно отражают геомеханические показатели взаимодействия крепи с горным массивом при любых проявлениях горного давления.

В аналитической форме уравнение ДСХ крепи имеет вид

$$U = f(q) \text{ или } q = f(U). \quad (1)$$

Эти зависимости определяют экспериментально на стендах по испытанию крепи в специализированных лабораториях или получают с использованием расчётных методов.

В зависимости от ДСХ различают два предельных (идеализированных) режима «работы» (взаимодействия с массивом) крепи: жёсткий и податливый (рис. 1). Крестиком на графиках показано разрушение крепи.

Жёсткий режим работы создается, когда крепь после контакта с массивом полностью останавливает или ограничивает возможные перемещения породного контура, с которым она контактирует. Например, если при проходке жёсткую крепь устанавливают с некоторым отставанием от забоя выработки, то породы после некото-

рого начального перемещения до установки крепи оказываются «жёстко» зафиксированы и это записывается равенством  $U = U_0 = Const$ , тогда как нагрузка на крепь начинает нелинейно возрастать во времени  $q = f(t)$  от нуля до некоторого конечного значения  $q_{жс}$  (рис. 1, линия 1).

В этом случае режим заданных смещений определяется в виде допустимых (фиксированных) крепью подвижек породного контура. На рисунке 1 режим заданных смещений  $U_{жс}$  представлен линией 1, которая показывает, что вначале породный контур сместился на величину  $U_{жс}$ , затем, после контакта с крепью, смещения пород остановились и начала возрастать нагрузка на крепь  $q$ . При достижении нагрузки предельного уровня  $q_{жс}$  происходит деформация крепи, т. е. она переходит в запредельный режим деформации, теряя свою несущую способность.

Податливый режим крепи представлен линией 2 (рис. 1) и характеризуется конструктивно заданным отпором крепи  $q_{п} = Const$ . Уровень допустимых нагрузок регулируется жесткостью податливых устройств, в рамной стальной крепи — с помощью натяжения гаек в узлах податливости. Такой режим работы крепи называют режимом заданных нагрузок, при постоянном значении которых увеличиваются смещения породного контура, контактирующего с крепью. Когда смещения массива, которые передаются на крепь, достигают предела конструктивной податливости крепи  $U_{п}$ , несущая способность крепи падает  $q < q_{п}$ , крепь переходит в запредельный режим работы и разрушается.

Сравнивая оба режима работы — податливый и жёсткий, — можно видеть, что для каждого необходимо задать как минимум по одному геомеханическому параметру: для жёсткой крепи —  $U_{жс}$ , для податливой —  $q_{п}$ , которые «отслеживаются» каждой крепью в процессе её взаимодействия с массивом. Однако эти исходные параметры дополняются предельными значениями нагрузки  $q_{жс}$  для жёсткой кре-

пи и предельной податливости  $U_{п}$  для податливой, после достижения которых нормальная эксплуатация крепей невозможна.

Режим линейно возрастающего сопротивления крепи представлен графиком 3 (рис. 1), когда до момента контакта крепи с породами контур сместился на величину  $U_0$ , а затем смещения крепи  $U(t)$  линейно растут пропорционально росту нагрузки  $q$  вплоть до предельной деформации крепи  $U = U_3$ . Степень «жёсткости» крепи определяется углом наклона  $\alpha$  графика ДСХ к оси  $U$ . Численно коэффициент жёсткости крепи  $k_{жс}$  равен

$$k_{жс} = \operatorname{tg}(\alpha), \text{ причём } 0 \leq k_{жс} < \infty, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — угол наклона линии 3 к горизонтальной оси  $U$ .

Крепь линейно возрастающего сопротивления (линия 3) описывается тремя параметрами: начальными допустимыми перемещениями до установки крепи  $U_0$ , предельно допустимыми смещениями крепи  $U_3$ , которые соответствуют предельной несущей способности крепи  $q_{жс}$ .

Чем больше коэффициент жесткости  $k_{жс}$ , тем ближе ДСХ крепи к жёсткому режиму работы, тем меньше крепь деформируется под действием горного давления. Для идеально податливой крепи  $k_{жс} = 0$ , для идеально жесткой  $k_{жс} \rightarrow \infty$ .

Наиболее общий случай ДСХ крепи представлен линией 4 с переменным коэффициентом жёсткости  $k_{жс}$ , в каждой точке графика он равен производной

$$k_{жс} = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{dq}{dU}. \quad (3)$$

### 3 Особенности работы крепи во времени

При достижении предельных значений  $q_{жс}$  для жёсткой крепи или  $U_{п}$  для податливой конструкция переходит в запредельное состояние, т. е. её расчётная схема претерпевает изменения: появляются пластические или хрупкие шарниры, происходит местная или полная потеря устойчивости, заклинивание податливых соедине-

ний, разрушения отдельных элементов, что меняет режим работы крепи.

Часто расчётная схема крепи в процессе взаимодействия с массивом меняется несколько раз. Так, в арочной стальной крепи по мере её нагружения последовательно сменяется этап жёсткого режима (до срабатывания узлов податливости) режимом заданной нагрузки, т. е. податливой работы. Затем появляется в наиболее напряжённом участке первый пластический шарнир, и арка из 2-шарнирной статически неопределимой становится 3-шарнирной статически определимой, причём её несущая способность может даже возрастать. Возможны и последующие этапы изменения расчётной схемы, чему способствует меняющийся контакт конструкции с окружающим массивом пород.

Тем не менее всегда на конечной стадии ДСХ крепи содержит «падающую» ветвь, у которой  $k_{жс} < 0$ . Это значит, что при увеличении деформаций  $U$  грузонесущая способность крепи  $q$  уменьшается. Иногда отрицательный коэффициент жёсткости  $k_{жс}$  называют модулем спада. При  $k_{жс} \rightarrow -\infty$  «падающая» ветвь резко обрывается вниз, а это значит, что крепь хрупко внезапно разрушается, представляя наиболее опасную форму аварии. Поэтому чем более пологая эта ветвь ДСХ, тем более безопасна крепь даже в период своего разрушения. К сожалению, запредельной стадии работы крепи, несмотря на многочисленные случаи отказов, до настоящего времени не уделялось достаточного внимания.

На рисунке 2 показаны графики изменения во времени отпора и деформации крепи разных режимов работы. Здесь достаточно наглядно видны различия между жёстким  $q_{жс}(t)$ ,  $U_{жс}(t)$  (линии 1) и податливым  $q_{п}(t)$ ,  $U_{п}(t)$  (линии 2) режимами работы крепи.

Анализ графиков показывает, что чем больше жёсткость крепи  $k_{жс}$ , тем меньшие смещения пород она допускает. Промежуточное положение занимает крепь нарастающего сопротивления (линии 3).

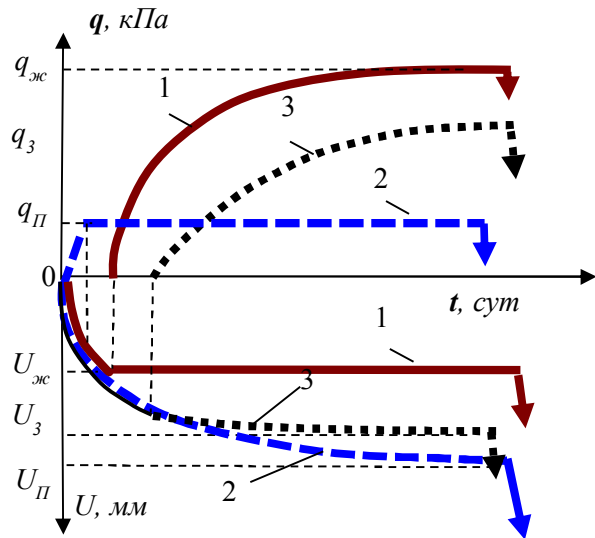


Рисунок 2 — Изменение параметров  $q$  и  $U$  у крепи с разными ДСХ во времени  $t$

В реальных конструкциях крепи их ДСХ различны в зависимости от условий взаимодействия с массивом, особенностей контакта с породой (сцепление, проскальзывание, толщина забутовки, её качество и т. д.), закономерностей распределения внешних нагрузок на крепь и их изменения во времени.

Поэтому у одной и той же крепи могут быть разные ДСХ по разным направлениям нагружения, при разных условиях контакта с массивом. Это заметно затрудняет оценку режима работы крепи, которая по одному направлению может быть податливой (например, по вертикали), а по другому (с боков) — жёсткой. Отсюда следует полезность использования еще одной функции, характеризующей конструкцию крепи при ее взаимодействии с окружающим массивом: функцию изменения жесткости крепи по угловой координате  $\theta$ , показывающей поведение крепи по разным направлениям ее нагружения  $k_{жс}(\theta)$ . Этот параметр следует сделать обязательным при указании технической характеристики крепи любой конструкции.

#### 4 Работоспособность крепи

Важной обобщённой геомеханической характеристикой крепи является её работоспособность, которая даёт количественную оценку работы, производимой конструкци-

ей крепи в процессе её противодействия проявлениям горного давления (4).

Поэтому представляет интерес определение работоспособности крепи при ее взаимодействии с массивом. Работоспособность конструкции характеризует работу противодействия крепи при ее смещении под воздействием внешней нагрузки. Ее удобно определять непосредственно из графика ДСХ каждой крепи — это будет не что иное, как площадь под этим графиком (рис. 1). Аналитически работоспособность крепи определяется по формуле

$$A(U) = \int_0^U q(x) dx, \quad (4)$$

где  $x$  — текущее значение смещений  $U$ ,  $0 \leq x \leq U$ .

Как следует из определения работоспособности, она зависит от её грузонесущей способности (отпора)  $q$  и податливости  $U$ . Абсолютно жёсткая крепь (рис. 1, линия 1), у которой под графиком нет площади, поскольку  $U=0$ , обладает нулевой работоспособностью  $A(0)=0$ .

Чем больше податливость крепи  $U$  при её взаимодействии с массивом, тем большую она совершает работу в процессе противодействия смещениям пород в выработку. Поэтому оказывается так важно обеспечить необходимую податливость конструкции крепи, что, как правило, позволяет избежать необходимости чрезмерного повышения её отпора, чего достигают за счёт увеличения материалоемкости при установке мощных крепей.

Рассмотрим показательный пример. Мощная монолитная железобетонная крепь ствола диаметром 8 м и толщиной 400 мм с несущей способностью (отпором) до  $q=10$  МПа под действием нагрузки за счёт упругого обжатия даёт податливость в пределах  $U=0,01$  м. Тогда её работоспособность равна

$$A(U) = 0,5 \cdot U \cdot q = 0,5 \cdot 0,01 \cdot 10^6 = 5 \text{ кДж},$$

где множитель 0,5 учитывает упругую работу крепи, когда её отпор увеличивает-

ся по линейному закону от 0 до  $q=10$  МПа).

Для сопоставления возьмём обычную податливую рамную кольцевую крепь из спецпрофиля, у которой несущая способность всего  $q=0,05$  МПа (т. е. в 200 раз меньше), зато податливый режим даёт смещения  $U=0,3$  м. Работоспособность такой податливой крепи равна (коэффициента 0,5 в формуле нет, поскольку здесь  $q=Const$ )

$$A(U) = U \cdot q = 0,3 \cdot 0,05 \cdot 10^6 = 15 \text{ кДж}.$$

Приведённое сравнение показывает, что податливая рамная крепь лёгкой конструкции с позиций работоспособности превосходит мощную жёсткую крепь в 3 раза.

Однако следует отметить, что зачастую все же приходится, не считаясь с затратами, применять жёсткие конструкции крепи, исходя из технологических требований к горной выработке (например, в камерах, где установлено стационарное оборудование и жесткие требования к соблюдению габаритных размеров).

В наиболее общем случае следует учесть особенности взаимодействия крепи с массивом горных пород. Для этого следует воспользоваться диаграммой, на которой отражаются деформационно-силовые характеристики крепи и массива (рис. 3).

### 5 Геомеханика взаимодействия крепи и массива пород

Диаграмма взаимодействия крепи и массива представляет собой графики ДСХ крепи и массива, наложенные друг на друга. На рисунке 3 показано несколько типов крепи: жёсткая 2, податливая 3, возрастающего сопротивления ОС.

Деформационно-силовая характеристика массива горных пород представлена линией 1 и состоит из различных участков:

–  $AB$ , где массив по мере разгрузки разрушается, снижая прочность, начиная с точки  $A$ , где она равна  $\sigma_\infty$ , до 0 в точке  $B$ ;

–  $BE$ , где массив по мере разгрузки интенсивно дробится и увеличивает свой объём



нагрузка начинает увеличиваться по мере роста смещений за счёт роста веса разрушенных пород в зоне запредельного деформирования.

Как следует из графиков рисунка 3, нагрузка на крепь и смещение контура во многом зависят от начальных смещений  $U_0$ , которые произошли до установки крепи, и от ДСХ крепи, т. е. её жёсткости. Так, линия 5 для менее жёсткой крепи пересекает ДСХ массива (линия  $ABDF$ ) на участке снижения нагрузки и значительных деформаций.

Нагрузку на крепь можно определить по точке пересечения ДСХ крепи и массива с учётом начальных смещений, что описывается равенством<sup>1</sup>

$$U(q) = U_0 + U_q. \quad (5)$$

Большую важность приобретает вопрос оценки минимально возможной нагрузки на крепь  $q_{\min}$  после образования зоны запредельного деформирования в кровле выработки. Из графиков на рисунке 3 становится ясным, что нельзя допустить, чтобы эффективный отпор крепи  $q_{ef}$  в выработке был меньше этого нижнего предела. Решение задачи по определению необходимого эффективного отпора крепи в зависимости от минимальной нагрузки  $q_{\min}$  [14] даёт следующие зависимости по её оценке:

$$q_{ef} > q_k \pm q_{\min} = q_k \pm \frac{\gamma a}{\mu - 1}, \quad (6)$$

где  $q_k$  — конструктивный отпор крепи, Па;

$\gamma$  — объёмный вес пород, кг/м<sup>3</sup>;

$a$  — половина ширины выработки, м;

$\mu$  — параметр устойчивости пород, вычисляют согласно [15] по формуле

$$\mu = 2 \frac{(k_\varphi - 1)p + \sigma_c^M}{2p - \sigma_c^M}, \quad (7)$$

где  $k_\varphi = (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi)$  — параметр угла внутреннего трения  $\varphi$  пород;

$p$  — давление вышележащей толщи горных пород, Па;

$\sigma_c^M$  — прочность пород массива на одноосное сжатие, Па.

В формуле (6) знак (–) берут при определении эффективного отпора крепи в кровле, а знак (+) следует брать для почвы выработки. Именно это значение эффективного отпора крепи  $q_{ef}$  следует считать воздействием крепи на разрушенные породы вокруг выработки и использовать при расчётах.

### 6 Расчётные схемы взаимодействия крепи с массивом

В процессе исторического развития методов расчёта крепи горных выработок расчётные модели и схемы претерпели заметное изменение и усложнение. Среди известных расчётных схем, с учётом их исторического развития, можно отметить следующие.

– Конструкция крепи представлена в виде рамы на жёстком основании, у которой различные элементы (стойки, верхняк, лежень и др.) соединены либо жёстко, либо посредством идеальных шарниров. Внешние вертикальные и боковые нагрузки на крепь со стороны массива имеют равномерное распределение и неизменную интенсивность. Расчёты сводят к вычислению внутренних усилий в элементах крепи, определению опасных сечений и выбору их прочных размеров по допустимым напряжениям.

– На основании предыдущей была использована более совершенная расчётная схема, в которой определение прочных размеров элементов производят с учётом их предельных состояний: по их напряжениям или предельным деформациям, хотя здесь также не учитывались деформации крепи.

– Следующим принципиально важным улучшением расчётной схемы стали пред-

<sup>1</sup>Это уравнение впервые было предложено и решено проф. Ф. А. Белаенко (ДГИ, 1955) и сыграло важную роль при изучении горного давления.



ложения по учёту пассивного отпора пород вокруг выработки, что нашло отражение в методе «Метрогипротранса» (метод Бодрова — Матэри, г. Москва, 1936), разработанном в период строительства метро для расчёта обделок тоннелей, когда крепи рассматривают как статически неопределимую систему, а окружающую породу — как упругое основание Винклера — Шведлера, способное воспроизводить «пассивный» отпор пород (1936).

– В связи со сложностью и большой трудоёмкостью расчётов были предложены многочисленные приближённые методики, в которых пассивный отпор заранее задают в виде эпюр различного очертания (эллипс, квадратная или кубическая парабола и т. д.), что было оправдано с практических позиций, но всё же являлось шагом назад в развитии предыдущего метода (1950–1980).

Однако все предложенные методы имели общий недостаток: в них нет обоснования определения величины и направления активных нагрузок со стороны пород.

Поэтому современное направление развития расчётных методик преследует цель учесть полное деформационно-силовое взаимодействие массива с крепью, когда нагрузки уже затруднительно разделить на активные и пассивные, а по мере развития горного давления они могут сменять друг друга.

В настоящее время достоверных методов расчёта крепи с учётом её реального взаимодействия с массивом не существует в силу значительной сложности задачи определения горного давления и исходных данных для расчёта, имеющих вероятностный характер (деформационные и прочностные свойства массива с учётом неоднородности его структуры, свойства крепи, влияние случайных технологических факторов и пр.).

Поэтому чаще всего используют расчётные схемы 3–4 этапов сложности, когда активная нагрузка на крепь задаётся на основании расчётных параметров проявлений горного давления или эмпирических

натурных замеров, а крепь рассчитывается как конструкция, взаимодействующая с породами, которые подчиняются закону линейно деформируемого основания.

Основной деформационной характеристикой пород при взаимодействии с крепью является коэффициент постели (отпора)  $k_{П}$ . Он показывает, какой величины напряжение — нормальное  $\sigma_n$  или касательное  $\tau_{nt}$  — надо приложить к породе, чтобы она получила единичное — соответственно нормальное  $u_n$  или касательное  $\gamma_{nt}$  — смещение. Таким образом, следует различать два вида коэффициентов отпора: нормальный  $k_{П\sigma}$  и касательный  $k_{П\tau}$ . Соответственно получаем

$$k_{П\sigma} = \sigma_n / u_n; k_{П\tau} = \tau_{nt} / \gamma_{nt}, [\text{МПа/м}]. \quad (8)$$

Кратко остановимся, как следует выбирать коэффициенты постели при расчёте крепи. В первую очередь следует различать показатели пород с разной степенью нарушенности или разрушения. Например, породы на контуре выработки обычно подвержены значительному растрескиванию и их жёсткость существенно уменьшается. Если порода разрушена и играет роль заполнения строительных зазоров за крепью («забутовка» закрепного пространства), то её деформационная жёсткость, которую отражает коэффициент отпора, окажется сниженной на несколько порядков.

Коэффициент нормального отпора  $k_{П\sigma}$  в строительных расчётах обычно оценивают по известной формуле Б. Г. Галёркина:

$$k_{П\sigma} = E_{\infty} / (R(1 + \nu)) \infty, \quad (9)$$

где  $E_{\infty}$  — модуль деформации массива, МПа; с учётом трещин и разрушения  $E_{\infty} = 0,01 \dots 0,1E$ , Па;

$E$  — модуль упругости пород, слагающих массив, Па;

$R$  — радиус крепи горной выработки, м;  
 $\nu$  — коэффициент Пуассона пород,  $\nu = 0,2 \dots 0,4$ .

В зависимости от технологии возведения различных конструкций крепи между кре-

пью и породой образуется строительный зазор в виде пустого пространства, которое следует заполнять (забучивать) кусками мелкой породы (забутовкой) или строительным раствором. Тогда коэффициент нормального отпора колеблется в значительных пределах, а в условиях заполнения забутовки строительным раствором в среднем этот коэффициент равен  $k_{Пт} \approx 0,1 \dots 0,4 k_{Пб}$ . Чем более плотно зазор за крепью заполнен, тем выше коэффициенты постели продольного и поперечного отпора.

При тщательном тампонировании закрепного пространства твердеющим раствором эти коэффициенты отпора могут повышаться вплоть до  $E_{\infty} = (1 \dots 8) 10^3$  МПа и более. На практике эти механические показатели пород в закрепном пространстве следует уточнять с помощью методов интроскопии и геофизическими исследованиями.

Таким образом, эффективная работа крепи зависит не только от совершенства ее конструкции, но и во многом от особенностей технологии ее возведения (тщательности заполнения закрепного про-

странства, времени и отставания от забоя выработки, правильности соблюдения технологических регламентов и пр.). Только в этом случае будут достаточно достоверными выводы, полученные в результате применения математических моделей и расчетных методов.

### **Выводы**

Выполненный обзор существующих геомеханических параметров, характеризующих основные показатели работы крепи, показал необходимость их упорядочения и дополнения. Самыми общими геомеханическими параметрами крепи являются ее деформационно-силовые характеристики (ДСХ) для разных наиболее ожидаемых видов нагрузок. По ним можно с достаточной для практики достоверностью определить жесткость и работоспособность крепей любых конструкций. Такие показатели позволят произвести сопоставление, оценку и обоснованный выбор наиболее оптимального в конкретных горно-геологических условиях варианта крепления для подземной горной выработки.

### **Список источников**

1. Агрикола Г. *О горном деле и металлургии в двенадцати книгах* / под. ред. С. В. Шухардина. 2-е изд. М. : Недра, 1986. 294 с.
2. Протодьяконов М. М. *Давление горных пород и рудничное крепление*. М.—Л. : Гостехиздат, 1930. 104 с.
3. *Горная энциклопедия*. М. : Сов. энциклопедия, 1985. Т. 2. 575 с.
4. Булычев Н. С., Абрамсон, Х. И. *Крепь вертикальных стволов шахт*. М. : Недра, 1978. 301 с.
5. Chudek M., Rulka K. *Konstrukcje siatkobetonowe w budownictwie podziemnych copalen*. Katowice : Shlas, 1975. 315 s.
6. Шишов Е. Л., Тюрин К. М. *Железобетонные ребристые тубинги для крепления стволов шахт*. Харьков : Металлургиздат, 1958. 150 с.
7. Баглашов И. В., Картозия Б. А. *Механика подземных сооружений и конструкции крепей* : учебник для вузов. 3-е изд., стер. М. : Студент, 2012. 543 с.
8. Каретников В. Н., Клейменов В. Б., Нурдихин А. Г. *Крепление капитальных и подготовительных выработок* : справочник. М. : Недра, 1989. 571 с.
9. Ерофеев Л. М., Мирошникова Л. А. *Повышение надежности крепи горных выработок*. М. : Недра, 1988. 245 с.
10. Литвинский Г. Г., Гайко Г. И., Кулдыркаев, Н. И. *Стальные рамные крепи горных выработок*. К. : Техника, 1999. 216 с.
11. Булат А. Ф., Виноградов В. В. *Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт*. Днепрпетровск : Институт геотехнической механики НАН Украины, 2002. 372 с.

12. Petar Jovanović. *Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorijskih prostora*. Beograd : Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta, 1994. T. 2. 316 s.

13. *SME mining engineering handbook* / Hartman H. L. [et al.]. 2nd ed. Sacramento, California : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1992. 2161 p.

14. Литвинский Г. Г. Обоснование минимального отпора крепи в горной выработке // Сборник научных трудов ДонГТУ. Алчевск : ДонГТУ, 2017. Вып. 6 (49). С. 15–25.

15. Литвинский Г. Г. Статика разрушения и деформирования пород вокруг горной выработки // Сборник научных трудов ДонГТУ. Алчевск : ДонГТУ, 2017. Вып. 7 (50). С. 19–30.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ГЭМС ДонГТУ Корнеевым С. В.,  
к.т.н., доц. каф. ГПБ, проректором по цифровой трансформации  
в образовательной деятельности ДонГТУ Шульгиным П. Н.**

Статья поступила в редакцию 01.10.2023.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**

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

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

#### **THE MAIN MODES OF OPERATION AND GEOMECHANICAL PARAMETERS OF THE INTERACTION BETWEEN THE LINING AND THE ROCK MASSIF**

*The main deformation and force modes of lining operation are considered: rigid and malleable. Their generalized characteristics are given in the form of a functional connection of geomechanical parameters that determine the work of lining: bearing capacity and perimeter displacements. To judge the nature of the resistance of lining to displacements, the stiffness coefficient of lining is proposed, which varies from 0 for a malleable to  $\infty$  for a rigid lining. The characteristic features of change in the deformation-force parameters of lining over time are considered. In order to estimate the total resistance of lining to external influences from the massif, the concept of the working capacity of lining is introduced. It is shown that the malleable lining of even light construction is much superior in performance to powerful rigid linings. To evaluate the parameters of the interaction between the lining with the rock massif, possible calculation schemes are compared. Recommendations on the choice of calculation methods of lining are given.*

**Key words:** lining, geomechanical parameters, deformations, bearing capacity, deformation-force characteristic, malleability, stiffness, load on the support, operability design schemes.

#### **References**

1. Agricola G. *Twelve books on mining and metallurgy*. eds S. V. Shukhardina. 2nd ed. [O gornom dele i metallurgii v dvenadcati kniga. pod. red. S. V. Shuhardina. 2-e izd]. M.: Nedra, 1986. 294 p. (rus)
2. Protod'yakonov M. M. *Rock pressure and mine fixtures* [Davlenie gornyykh porod i rudnichnoe kreplenie]. M.-L.: Gostekhizdat, 1930. 104 p. (rus)
3. *Mining encyclopedia* [Gornaya enciklopediya]. M.: Sovetskaya enciklopediya, 1985. Vol. 2. 575 p. (rus)
4. Bulychev N. S., Abramson, Kh. I. *Lining of the vertical shafts of mine* [Krep' vertikal'nykh stvolov shakht]. M.: Nedra, 1978. 301 p. (rus)
5. Chudek M., Rulka K. *Konstrukcje siatkobetonowe w budownictwie podziemnych copalen*. Katowice : Shtlas, 1975. 315 p.

6. Shishov E. L., Tiurin K. M. Reinforced concrete ribbed tubing for shaft attachment [Zhelezobetonnye rebristyie tyubingi dlya krepeleniya stvolov shakht]. Khar'kov: Metallurgizdat, 1958. 150 p. (rus)
7. Baklashov I. V., Kartoziya B. A. Mechanics of underground structures and fasteners: textbook. 3rd ed., stereotype. [Mekhanika podzemnyh sooruzhenij i konstrukcii krepej : uchebnik dlya vuzov. 3-e izd., ster]. M.: Student, 2012. 543 p. (rus)
8. Karetnikov V. N., Klejmenov V. B., Nuzhdikhin A. G. Fixation of capital and preparatory workings: handbook [Kreplenie kapital'nyh i podgotovitel'nyh vyrabotok: spravochnik]. M.: Nedra, 1989. 571 p. (rus)
9. Erofeev L. M., Miroshnikova L. A. Increase of mine lining reliability [Povyshenie nadezhnosti krepj gornyx vyrabotok]. M.: Nedra, 1988. 245 p. (rus)
10. Litvinsky G. G., Gaiko G. I., Kudyrkaev, N. I. Steel frame joints of mining workings [Stal'nye ramnye krepj gornyx vyrabotok]. K.: Tekhnika, 1999. 216 p. (rus)
11. Bulat A. F., Vinogradov V. V. Anchoring of coal mine workings. [Oporno-ankernoje kreplenie gornyx vyrabotok ugol'nyh shakht]. Dnepropetrovsk.: Institute of Geotechnical Mechanics of NAS of Ukraine, 2002. 372 p. (rus)
12. Petar Jovanović. Proektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorija. Beograd : Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta, 1994. Vol. 2. 316 p.
13. Hartman H. L. [et al.]. SME mining engineering handbook. 2nd ed. Sacramento, California : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1992. 2161 p.
14. Litvinsky G. G. Rationale for minimum bearing reaction of lining to mine workings [Obosnovanie minimal'nogo otpora krepj v gornoj vyrabotke]. Scientific works collection of DonSTU. Alchevsk. 2017. Iss. 6 (49). Pp. 15–25. (rus)
15. Litvinsky G. G. Statics razrusheniya i deformirovaniya porod vokrug gornoj vyrabotki [Statika razrusheniya i deformirovaniya porod vokrug gornoj vyrabotki]. Scientific works collection of DonSTU. Alchevsk. 2017. Iss. 7 (50). Pp. 19–30. (rus)

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

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

УДК 622.258; 622.534

**\*Князьков О. В., Смекалин Е. С., Денисова Н. А.**  
 Донбасский государственный технический университет  
 \*E-mail: dmtti\_ot@mail.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОДООТЛИВНОГО КОМПЛЕКСА ш. «КОМСОМОЛЬСКАЯ»

*В результате ликвидации шахт, связанных с шахтой «Комсомольская» прямыми и косвенными гидравлическими связями, ожидается увеличение водопритока, что требует подготовки водоотливного хозяйства для приема дополнительного объема воды. Разработан ряд технических мероприятий для реконструкции водоотливного комплекса, одним из которых является замена труб водоотливного става на больший диаметр. Проанализированы результаты визуального и измерительного контроля по оценке фактического состояния металлоконструкций армировки вспомогательного ствола с целью определения схемы крепления трубопроводов. Расчетным путем обоснован рациональный метод крепления трубопровода большего диаметра водоотливного комплекса шахты «Комсомольская».*

**Ключевые слова:** шахта, армировка ствола, водоотливной комплекс, водоприток.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** За последние 25 лет на территории Восточного Донбасса ликвидировано большое количество шахт. Ликвидация угольных шахт в основном происходит путем их частичного или полного затопления за счет естественного водопритока после остановки работы общешахтного водоотлива [1]. Подъем уровня подземных вод в шахте приводит к изменению гидрогеологической обстановки, сложившейся в период ведения горных работ, с высокой долей вероятности может вызывать экологические и социальные последствия, связанные с подтоплением территорий, на которых проживают люди, ведутся сельхозработы или расположены предприятия и коммуникации. Дополнительный водоприток также усугубляет работу соседних шахт, имеющих гидравлические связи с закрытыми шахтами. Решение данных проблем требует разработки технических и административных мер, на которые необходимо затратить значительные ресурсы.

Шахта «Комсомольская» шахтоуправления «Ясеновское» ГУП ЛНР «РТК „Востокуголь“» имеет прямые гидравлические связи с закрытыми шахтами

«Партизанская», имени газеты «Луганская правда» и действующей шахтой имени В. В. Вахрушева, а также косвенные гидравлические связи со смежными шахтами «Крепенская» и имени М. В. Фрунзе. На западе горные выработки шахты «Комсомольская» связаны с выработками шахты «Партизанская» через старую шахту № 44 по пласту  $h_7$ . Восточные лавы № 24 и № 25 пласта  $h_7$  шахты «Партизанская» отрабатывали запасы угля через 8-й западный вентиляционный штрек пласта  $h_7$  бывшей шахты № 44 (отметка минус 260,2 м), в дальнейшем вошедшей в состав шахты «Комсомольская». Кроме того, шахта «Партизанская» сбита с ликвидируемой и затапливаемой шахтой «Крепенская» горными выработками по пласту  $h_8$  через вентиляционный ходок, пройденный с погашенного 12-го откаточного штрека шахты «Крепенская» (отметка минус 654,4 м) на законсервированный 24-й откаточный штрек шахты «Партизанская» (отметка минус 583,8 м), и через погашенный транспортный ходок 26-го западного откаточного штрека шахты «Партизанская» (отметка минус 714,1 м). Имеется связь через очистные работы 26-й западной лавы шахты «Партизанская», что

исключает возможность надежной гидроизоляции горных выработок шахты «Партизанская» в случае затопления шахты «Крепенская».

**Постановка задачи.** Согласно прогнозным расчетам, выполненным ГУП ЛНР «Востокгеология» в 2018 году в Гидрогеологическом заключении по прогнозно-гидрогеологическим работам для изучения влияния гидросвязей на гидрогеологическую обстановку Филиала «Шахта „Партизанская“» при закрытии шахты «Крепенская» [2], переток шахтных вод с ликвидируемой шахты «Крепенская» на шахту «Партизанская» ожидался с января 2019 года, что подтверждено данными практики.

Прогнозные перетоки воды с ликвидируемой шахты «Крепенская» на горизонт 30 штреков пласта  $h_8$  шахты «Партизанская», согласно расчету, составили  $Q_{\text{норм.}} = 79 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_{\text{макс.}} = 124 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Согласно прогнозному расчету, уровень затопления шахты «Партизанская» достигнет абсолютной отметки гидравлической связи с шахтой «Комсомольская» спустя 4 года 11 месяцев от расчётной даты начала затопления. Переток воды с шахты «Партизанская» на горизонт 960 м шахты «Комсомольская» составит:  $Q_{\text{норм.}} = 140 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_{\text{макс.}} = 180 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Как указано выше, горные выработки шахты «Партизанская» связаны с выработками шахты «Комсомольская» через старую шахту № 44 по пласту  $h_7$ . Восточные лавы № 24 и № 25 пласта  $h_7$  шахты «Партизанская» отрабатывали запасы угля через 8-й западный вентиляционный штрек пласта  $h_7$  бывшей шахты № 44 (отметка минус 260,2 м), в дальнейшем вошедшей в состав шахты «Комсомольская». С учетом отметки перетока горные выработки шахты «Партизанская» не могут быть затоплены выше абсолютной отметки минус 250 м при условии работы водоотлива шахты «Комсомольская».

Шахта «Комсомольская» через зоны трещиноватых пород Яковлевского, Щетовских и Лобовского Западного сбросов имеет гидравлическую связь с ликвидируемой и

затапливаемой шахтой имени газеты «Луганская правда». Шахта имени газеты «Луганская правда» на горизонтах 19-х, 16-х и 13-х штреков пересечены трещиноватые зоны вышеуказанных сбросов, которые прослеживаются также в пределах поля шахты «Комсомольская». По зонам сбросов отмечен переток воды в количестве  $Q_{\text{норм.}} = 140 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_{\text{макс.}} = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Ликвидированная шахта имени газеты «Луганская правда» и действующая шахта имени В. В. Вахрушева имеют гидравлические связи через зону дробления и перемятых пород сброса Лобовский Западный. Действующие шахты имени В. В. Вахрушева и «Комсомольская» имеют связи через вскрытые горные выработки обеих шахт на отметке минус 580 м, сбросы Ясеновский I и Ясеновский II, а кроме того, через поле шахты имени газеты «Луганская правда» и сбросы Яковлевский, Щетовский и Лобовский Западный.

При совместном затоплении всех указанных закрытых шахт разгрузка шахтных вод возможна на горном отводе шахты «Крепенская», гидравлически связанной с шахтой «Комсомольская». Выход воды ожидается в балке Крепенская через устье восточной вентиляционной сбойки шахты «Крепенская» на отметке около плюс 110 м.

Для дальнейшей работы шахты «Комсомольская» реконструируемый водоотливный комплекс шахты должен обеспечить выдачу притока шахтной воды в количестве: общий водоприток —  $Q_{\text{норм.}} = 1090 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_{\text{макс.}} = 1377 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; в том числе:

– собственный существующий водоприток шахты «Комсомольская» —  $Q_{\text{норм.}} = 750 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_{\text{макс.}} = 950 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

– переток с шахты «Партизанская» —  $Q_{\text{норм.}} = 140 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_{\text{макс.}} = 180 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

– дополнительный водоприток при отработке запасов на ближайшие годы —  $Q_{\text{норм.}} = 80 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_{\text{макс.}} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

– дополнительный водоприток с шахты имени М. В. Фрунзе —  $Q_{\text{норм.}} = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_{\text{макс.}} = 147 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

В соответствии с этим необходимо подготовить водоотливное хозяйство шахты

## НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

«Комсомольская» для приема дополнительного объема воды. Для этого требуется заменить существующие разнотипные насосные агрегаты главных водоотливных установок на горизонте 690 м на насосные агрегаты ЦНС 500-800, а также на горизонте 960 м — на насосные агрегаты ЦНС 500-360. Кроме того, в соответствии с разработанными ГУП ЛНР «РТК „Востокуголь“» совместно с ГУП ЛНР «ЛНИПКИУгледобогачение» мероприятиями по подготовке водоотливного хозяйства шахты «Комсомольская» для приема дополнительного объема шахтных вод необходимо произвести замену труб водоотливного става Ø250 мм на трубы Ø325 мм.

**Целью** настоящей работы являются обследование и оценка технического состояния опорных и поддерживающих расстрелов металлоконструкций армировки вспомогательного ствола шахты «Комсомольская».

**Объект исследования** — опорные и поддерживающие расстрелы вспомогательного ствола шахты «Комсомольская».

**Предмет исследования** — напряжения, возникающие в расстрелах с учетом веса трубопроводов и их внутренним содержимым.

**Задачи исследования:**

– изучение расположения оборудования во вспомогательном стволе, схемы крепления трубопроводов, схемы расположения опорных и поддерживающих балок, способов крепления балок;

– обследование фактических условий эксплуатации опорных и поддерживающих балок, выявления дефектов, механических повреждений, деформаций, степени коррозии;

– определение несущей способности металлоконструкций с учетом нагрузок.

**Методика исследования.** На первом этапе обследования производился предварительный осмотр объекта с целью определения объема, специфики и направленности контроля. Выполнялись подготовительные работы.

На втором этапе проанализирована техническая документация, в частности изучены: схема расположения оборудования

во вспомогательном стволе, схема крепления трубопроводов, схема расположения опорных и поддерживающих балок, методы крепления балок. Рассмотрены условия работы обследуемых металлоконструкций на предмет наличия агрессивной среды, температурного режима, мест приложения постоянных нагрузок.

Третий этап предполагал предварительное (визуальное) обследование несущих металлоконструкций армировки вспомогательного ствола. Визуальное обследование проводилось с целью определения фактических условий эксплуатации опорных и поддерживающих балок, выявления дефектов, механических повреждений, деформаций, степени коррозии.

На четвертом этапе производилось детальное (инструментальное) обследование, включающее определение геометрических параметров металлоконструкций путем непосредственных измерений. Длина и ширина балок определялись с помощью измерительной металлической линейки и рулетки. Толщина стенок опорных и поддерживающих балок измерялась с помощью ультразвукового толщиномера типа УТ-507. Измерения проводились на частоте 5 кГц. Сечения и точки, в которых производились измерения, представлены на рисунке 1.

**Изложение материала.** Вспомогательный ствол диаметром 8,0 м пройден на глубину 1016 м и оборудован двумя многоканатными подъемами: двухклетевым и одноклетевым с противовесом для выполнения операций по спуску-подъему людей, материалов, оборудования и периодической выдачи породы с гор. 690 м, 760 м и 960 м. В стволе размещаются: три двухэтажные клетки, вмещающие по одной вагонетке ВД-3,3 на этаже и противовес; два става временного водоотлива диаметром по 250 мм каждый до гор. 960 м; два става противопожарно-производственного водоснабжения диаметром по 150 мм каждый до гор. 960 м; став для слива воды диаметром 250 мм с гор. 690 м в зумпф; один став сжатого воздуха диаметром 300 мм до

гор. 960 м (после пуска постоянного водоотлива в главном стволе ставы временного водоотлива используются как резервные при аварийной ситуации в работе водоотлива), силовые, сигнальные и телефонные кабели.

Армирование ствола запроектировано в соответствии с методикой расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт ВНИИГМ им. М. М. Федорова [3]. Армирование жесткая коробчатая с лобовым расположением проводников. Опорные расстрелы (балки) сечением  $650 \times 220$  мм установлены парами через каждые 80–110 м ствола. Поддерживающие расстрелы (балки) выполнены из двутаврового профиля  $400 \times 160$  мм с шагом установки 8 м, коробчатые проводники выполнены сечением  $100 \times 160$  мм. Ствол оборудован лестничным отделением со спасательной лестницей с поверхности до гор. 960 м со специальными выходами на горизонты 960 м и 760 м и ниже их. Предусмотрено также оборудование для посадки людей в клеть на уровне трубного ходка гор. 960 м.

По вспомогательному стволу поступает свежий воздух на горизонты 760 м и 960 м, а также для проветривания камер гор. 690 м.

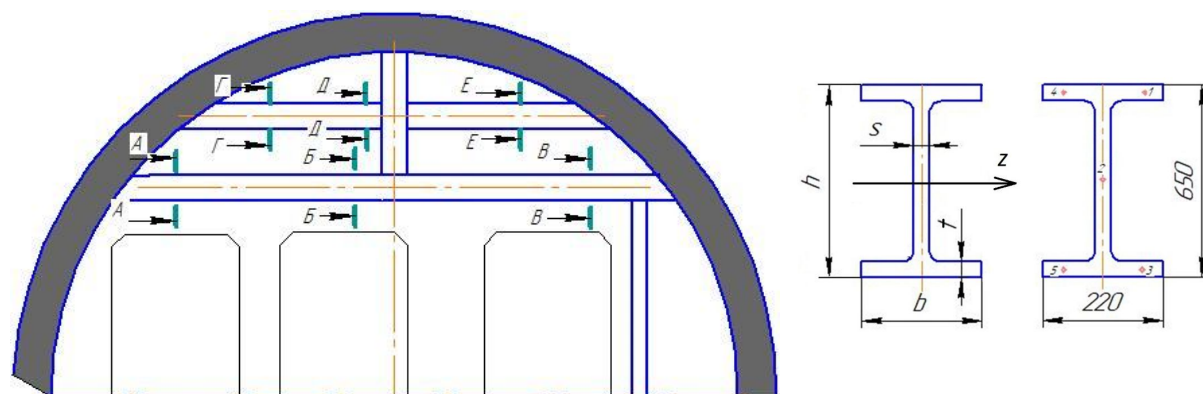
Краткая характеристика вспомогательного ствола представлена в таблице 1.

Схема расположения оборудования во вспомогательном стволе на момент проведения обследования приведена на рисунке 2.

Для определения фактического состояния несущих металлоконструкций армировки вспомогательного ствола шахты «Комсомольская» выполнялся визуальный и измерительный контроль [4]. Процесс контроля осуществлялся поэтапно.

Для проведения проверочных расчетов с целью определения несущей способности металлоконструкций с учетом нагрузок выполнен лабораторный анализ химического состава материала опорных балок. Полученный химический состав соответствует стали конструкционной углеродистой качественной 15пс.

Проведение проверочных расчетов для оценки несущей способности металлоконструкций выполнялось с использованием пакета прикладных программ Mathcad. В качестве исходных данных для расчета принимались значения, полученные в результате измерений размеров поперечных сечений опорных балок с помощью ультразвуковой толщинометрии.



А-А, Б-Б, В-В, Г-Г, Д-Д, Е-Е — сечения балки, в которых проводились измерения;  
1, 2, 3, 4, 5 — точки замеров; h, b — высота и ширина двутавра; S, t — толщина соответственно шейки и подложки двутавра; z — горизонтальная осевая линия

Рисунок 1 — Схема замеров толщины стенок опорных и поддерживающих балок

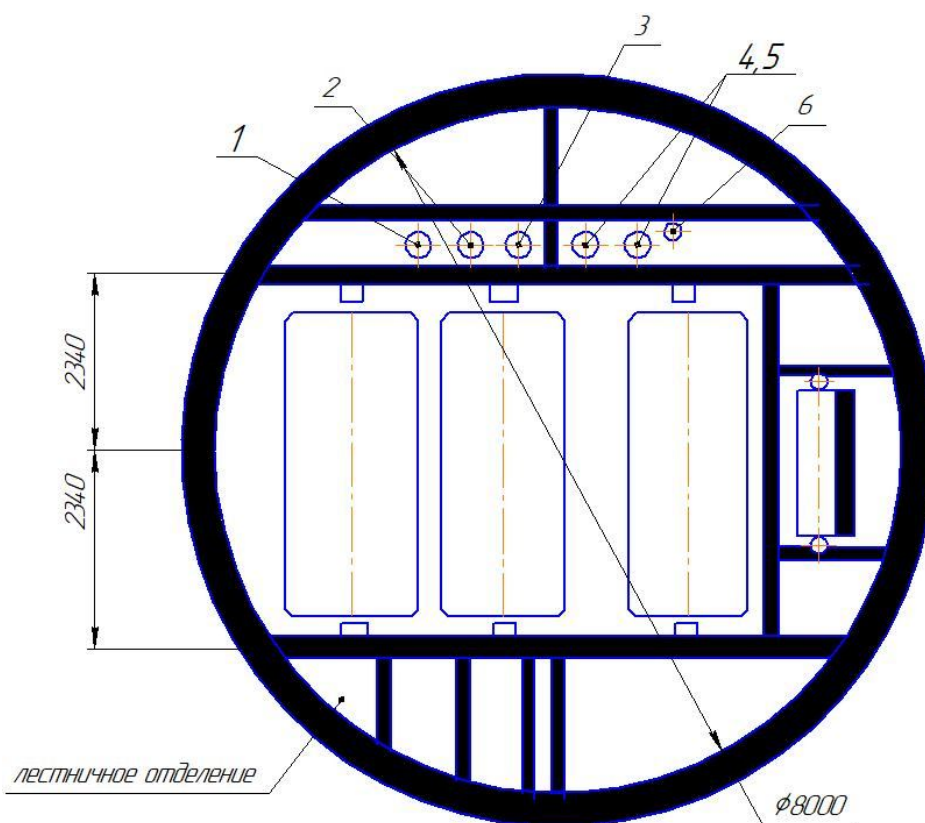


**НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ**

Таблица 1

Характеристика ствола

№ п/п	Показатели	Ед. изм.	Вспомогательный ствол
1	Абсолютная отметка устья ствола	м	+259,55
2	Глубина ствола без зумпфа	м	960
3	Глубина зумпфа	м	56
4	Полная глубина ствола, включая зумпф и технологический отход	м	1016
5	Диаметр ствола в свету	м	8
6	Площадь сечения ствола в свету	м <sup>2</sup>	50,3
7	Вид крепи ствола		бетон
8	Длина устья ствола	м	15
9	Толщина крепи ствола	мм	500
10	Крепь устья ствола	-	ж/б
11	Толщина крепи устья ствола	мм	800
12	Армирование ствола	-	коробчатые проводники расстрелы — двутавр
13	Год ввода в эксплуатацию	-	1977



1 — трубопровод с проложенным силовым кабелем; 2 — противопожарный трубопровод, 3 — трубопровод для отвода воды; 4, 5 — трубопровод водоотлива (подлежащий замене на Ø325 мм); 6 — трубопровод сжатого воздуха

Рисунок 2 — Схема расположения оборудования и трубопроводов во вспомогательном стволе на момент обследования

Расчет максимальных нормальных напряжений в поперечных сечениях опорных балок основывался на нагрузках, действующих со стороны установленных в настоящее время трубопроводов.

Нагрузка от веса трубопроводов с внутренним содержимым передается на металлоконструкцию опорной балки из расчета половины длины до ближайшего верхнего (нижнего) крепления с учетом дополнительного запаса на прочность, составляющего 20 %.

Для определения максимальных нормальных напряжений в поперечных сечениях опорных балок использовалось условие прочности при изгибе:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_z}, \quad (1)$$

где  $M_{\max}$  — максимальный изгибающий момент в соответствующей опорной балке;

$W_z$  — осевой момент сопротивления поперечного сечения опорных балок.

Величина допускаемого напряжения определялась по величине предела текучести  $\sigma_T$ :

$$\sigma = \frac{\sigma_T}{n_T}, \quad (2)$$

где  $n_T$  — коэффициент запаса по пределу текучести ( $n_T = 1,4-1,6$ ).

Величина осевого момента сопротивления определялась по размерам поперечных сечений соответствующих опорных балок, исходя из минимальных значений для учета возможного снижения их несущей способности.

Максимальные значения осевой момент сопротивления принимает в наиболее удаленных от осевой горизонтальной линии  $z$  точках поперечного сечения балки (рис. 1), которые определялись как отношение осевого момента инерции  $I_T$  поперечного сечения относительно оси  $z$  к расстоянию от оси до крайней верхней (нижней) точки сечения:

$$W_z = \frac{I_T}{0,5h}. \quad (3)$$

Осевой момент инерции отдельной балки относительно оси  $z$  определялся как для сечения, состоящего из простейших прямоугольных сечений с учетом правила параллельного переноса осей по формуле:

$$I_T = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot t \cdot \left( \frac{h}{2} + \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{s \cdot \left( \frac{h}{2} - t \right)^3}{12} + \left[ \frac{\left( \frac{h}{2} - t \right)}{2} \right] \cdot s \cdot \left( \frac{h}{2} - t \right). \quad (4)$$

При расчете изгибающих моментов в опорных балках был применен принцип суперпозиции (принцип независимости действия сил). Результирующая эпюра моментов для каждой балки получена как сумма изгибающих моментов от рассчитанных по отдельности сил, действующих на жестко закрепленную с двух сторон балку.

При этом максимальное напряжение на наиболее нагруженном горизонте  $H = 482$  м составило 81,44 МПа.

При замене трубопроводов 4 и 5 (рис. 2) на трубопроводы большего сечения, при такой же схеме их крепления на опорных балках, как и в исходном варианте, величина максимального нормального напряжения на наиболее нагруженном горизонте  $H = 482$  м увеличится до 128,3 МПа.

Крепление трубопроводов 4, 5 к опорным балкам по глубине ствола возможно по двум схемам: *a* и *b* (рис. 3).

По результатам расчетов при креплении трубопроводов 4 и 5 по схеме *a* максимальное нормальное напряжение в наиболее нагруженном горизонте составило  $\sigma = 96,37$  МПа. При креплении трубопроводов 4 и 5 по схеме *b* максимальное нормальное напряжение в наиболее нагруженном горизонте составило  $\sigma = 91,98$  МПа. При сравнении вариантов крепления трубопроводов на расстрелах, учитывая меньшее значение максимального нормального напряжения, которое не превышает допускаемого напряжения, определяемого расчетом по пределу

текучести 160 МПа при значении предела текучести 252 МПа, можно считать наиболее рациональным вариант крепления новых трубопроводов 4 и 5 на разных горизонтах ствола по схеме б (рис. 3). На основании проведенных исследований разработан проект реконструкции водоотливного комплекса шахты «Комсомольская» [5].

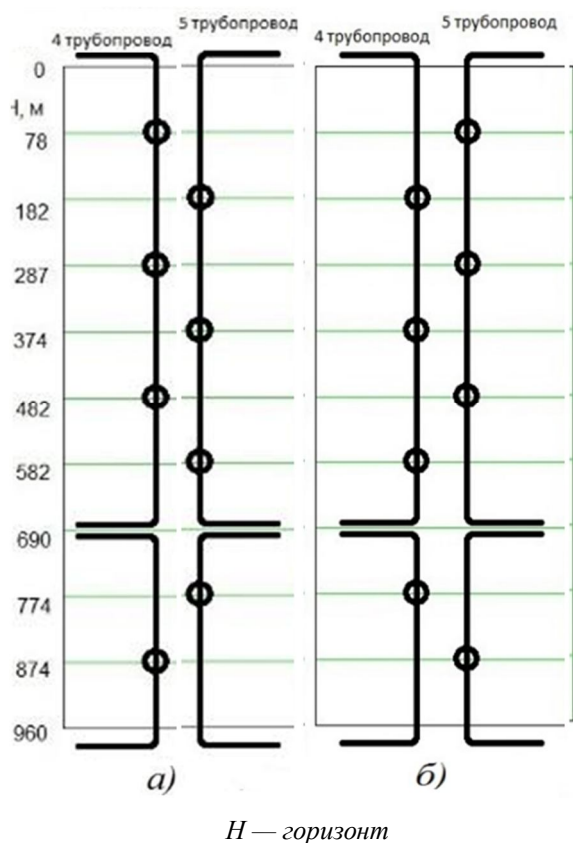


Рисунок 3 — Крепление заменяемых трубопроводов 4 и 5

### Список источников

1. Лукьянов А. Е., Стеценко О. П. Проблемы гидрогеологического обеспечения ликвидации угольных шахт [Электронный ресурс] // Неофициальный сайт Научно-производственной группы «Тектоника»: [сайт]. [2023]. URL: <http://geomaster1.ucoz.ru/index/0-44>.
2. Гидрогеологическое заключение по прогнозно-гидрогеологическим работам для изучения влияния гидросвязей на гидрогеологическую обстановку Филиала «Шахта „Партизанская“» при закрытии шахты «Крепенская». Луганск: ГУП ЛНР «Востокгеология», 2018. 32 с.
3. Методика расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт / ВНИИГМ им. М. М. Федорова Минуголепрома СССР. Донецк, 1983. 173 с.
4. Обследование технического состояния несущих металлоконструкций армировки вспомогательного ствола шахты «Комсомольская» ПП «Шахтоуправление „Ясеновское“» ГУП

**Вывод.** В ходе выполнения работы определены фактические значения остаточной толщины опорных и поддерживающих балок вертикального вспомогательного ствола шахты «Комсомольская» шахтоуправления «Ясеновское» ГУП ЛНР «РТК „Востокуголь“» методом визуально-измерительного и неразрушающего контроля, рассчитаны с использованием пакета прикладных программ Mathcad нормальные напряжения в опорных расстрелах при воздействии на них фактических нагрузок, возникающих при замене водоотливных трубопроводов. По результатам выполненных исследований [4] рекомендуется производить крепление водоотливного става по предлагаемой схеме. Результаты проведенных исследований использованы при разработке проекта реконструкции водоотливного комплекса шахты «Комсомольская» [5].

В дальнейшем, после монтажа трубопроводов Ø325 мм, в процессе эксплуатации необходимо:

- исключить динамические воздействия (удары) на расстрелы;
- периодически проводить осмотр всех опорных балок (расстрелов) на наличие деформации с фиксацией информации в книге осмотра ствола;
- при возникновении деформации принять меры к уменьшению напряжений, воздействующих на расстрелы, путем установки дополнительного крепления на расположенных выше и ниже балках.

ЛНР «РТК „Востокуголь“»: отчет о НИР / Донбас. гос. техн. ин-т ; исполн. : Князьков О. В. [и др.]. Алчевск, 2022. 36 с.

5. Реконструкция водоотливного комплекса шахты «Комсомольская» ПП «Шахтоуправление „Ясеновское“» ГУП ЛНР «РТК „Востокуголь“», ГУП ЛНР «ЛНИПКИУглеобогащение»: проект. Луганск, 2022. 45 с.

© Князьков О. В., Смекалин Е. С., Денисова Н. А.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ГБП ДонГТУ Леоновым А. А.,  
зам. гл. инженера по производству и капитальному развитию  
ГУП ЛНР «Востокуголь» и. «Белореченская» Чепурным Д. С.**

Статья поступила в редакцию 23.10.2023.

### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Князьков Олег Владимирович**, канд. техн. наук, доцент каф. геотехнологий и безопасности производств, и. о. декана горного факультета  
Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,  
e-mail: dmmi\_ot@mail.ru

**Смекалин Евгений Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент каф. геотехнологий и безопасности производств, проректор по научной работе  
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

**\*Knyazkov O. V., Smekalin Ye. S., Denisova N. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, \*e-mail: dmmi\_ot@mail.ru)

### **DETERMINATION OF A RATIONAL SCHEME FOR FIXING PIPELINES DURING THE RECONSTRUCTION OF THE DRAINAGE COMPLEX OF “KOM SOMOLSKAYA” MINE**

*As a result of mines abandonment associated with the “Komsomolskaya” mine by direct and indirect hydraulic connections, it is expected to increase the water inflow, which requires the preparation of a drainage farm to receive additional water. A number of technical measures have been developed for the reconstruction of the drainage complex, one of which is the replacement of the drainage pipe by a larger diameter. The results of visual and measuring control are used to assess the actual state of the serving shaft furnishing metal structures and determine the mounting scheme of pipelines. A calculated method has been used to support the rational method of installing a larger diameter pipeline for the water-drainage complex at the “Komsomolskaya” mine.*

**Key words:** mine, shaft furnishing, drainage complex, water inflow.

### **References**

1. Luk'yanov A. E., Stecenko O. P. Problems of hydrogeological support of coal mine abandonment [Problemy gidrogeologicheskogo obespecheniya likvidacii ugol'nyh shakht]. Neoficial'nyj sajt Nauchno-proizvodstvennoj grupy “Tektonika”. URL: <http://geomaster1.ucoz.ru/index/0-44>.

2. Hydrogeological conclusion on predicting and hydrogeological works for studying the influence of hydro-connections on the hydrogeological situation of the branch “Partizanskaya” mine at the closure

of “Krepenskaya” mine [Gidrogeologicheskoe zaklyuchenie po prognozno-gidrogeologicheskim rabotam dlya izucheniya vliyaniya gidrosvyazey na gidrogeologicheskuyu obstanovku Filiala “Shakhta ‘Partizanskaya’” pri zakrytii shakhty “Krepenskaya”]. Lugansk: SUE LPR “Vostokgeologiya”, 2018. 32 p. (rus)

3. Method for calculating rigid reinforcements of vertical shafts in mines [Metodika rascheta zhestkih armirovok vertikal'nyh stvolov shakht]. ARRIRM named after M. M. Fedorova Ministry of Coal Industry of USSR. Donetsk, 1983. 173 p. (rus)

4. Knyaz'kov O. V. [et al.]. Inspecting the technical condition of the bearing and supporting beams of vertical servicing shaft of the “Komsomolskaya” mine of the PD “Yasenovskoye” mine office of SUE LPR “RFC “Vostokugol””: research report [Obsledovanie tekhnicheskogo sostoyaniya nesushchih metallokonstrukcij armirovki vspomogatel'nogo stvola shakhty “Komsomol'skaya” PP “Shakhtoupravlenie ‘Yasenovskoe’” GUP LNR “RTK ‘Vostokugol’”]: otchet o NIR]. Alchevsk: DonSTU, 2022. 36 p. (rus.)

5. Reconstruction of the drainage complex of the “Komsomolskaya” mine of the PD “Yasenovskoye” mine office of SUE LPR “RFC ‘Vostokugol’”, SUE LPR “LNIPKIUgleobogaschenie” project [Rekonstrukciya vodootlivnogo kompleksa shakhty “Komsomol'skaya” PP “Shakhtoupravlenie ‘Yasenovskoe’” GUP LNR “RTK ‘Vostokugol’”, GUP LNR “LNIPKIUgleobogashchenie”: proekt]. Lugansk, 2022. 45 p. (rus)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Knyazkov Oleg Vladimirovich**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety, Acting Dean of the Mining Faculty  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia  
e-mail: dmmi\_ot@mail.ru

**Smekalin Yevgeniy Sergeevich**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety, Vice-Rector for Science  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

**Denisova Nataliia Anatoliievna**, PhD in Engineering, Assistant Professor, Head of the Department of Metallurgical Complex Machines  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

**МЕТАЛУРГИЯ**

---

**METALLURGY**



УДК 669.04:669.054.8

**Кухарев А. Л., \*Куберский С. В., Кононенко Г. И.**  
 Донбасский государственный технический университет  
 \*E-mail: Skuberskiy@yandex.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ДУГОВОМ ГЛУБИННОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ

*Предложена математическая модель, позволяющая оценить параметры теплопереноса при дуговом глубинном восстановлении элементов из силикомарганцевого шлака в железоуглеродистый расплав. Показано, что при использованных граничных условиях не вся реакционная поверхность рудно-восстановительного блока прогревается до температуры начала карботермического восстановления марганца и кремния. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами опытно-промышленного опробования технологии. Предложены пути повышения эффективности процесса ДГВ, обеспечивающие увеличение степени извлечения элементов из оксидных рудно-восстановительных смесей.*

**Ключевые слова:** техногенные отходы, рециклинг, раскисление-легирование, железоуглеродистый расплав, электрическая дуга, восстановление, математическая модель, теплоперенос, распределение температур, степень извлечения.

Концепция технологического развития до 2030 года [1], Стратегия развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г. [2], а также Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) [3] в качестве основных направлений, стратегических задач и приоритетных направлений исследований предусматривают стимулирование создания новых ресурсо- и энергосберегающих металлургических процессов, включая углубленную переработку бытовых и техногенных отходов для снижения их негативного воздействия на окружающую среду и зависимости металлургических предприятий России от импорта ферросплавов, сырья и материалов.

Одним из таких процессов является дуговое глубинное восстановление (ДГВ) элементов в железоуглеродистые расплавы для их раскисления-легирования, рафинирования, гомогенизации и нагрева [4]. В качестве основного рудного сырья в технологии ДГВ используются различные техногенные отходы (шлак, шлам, пыль, огнеупорный лом, бедные руды, отходы обогащения и т. д.), что обеспечивает их эффек-

тивный рециклинг, энерго- и ресурсосбережение, а также улучшение экологической обстановки за счет снижения негативного влияния на окружающую среду. Метод ДГВ был успешно реализован для насыщения железоуглеродистых расплавов магнием, кальцием, марганцем, кремнием, восстанавливаемыми из боя бывшего в употреблении огнеупорного кирпича, некондиционной извести и доломита, бедной марганцевой руды, передельного марганцевого шлака, шлама сухих ферросплавных газоочисток и отвального шлака производства товарного силикомарганца, а также обычного речного песка (взамен традиционного кварцита). Применение метода ДГВ для десульфурации чугуна и раскисления-легирования черных металлов в ковшах небольшой емкости (0,16–1,0 т), характерных литейным предприятиям и металлургическим микро-заводам, позволило обеспечить значительный экономический и экологический эффект.

Достаточно важным для технологии ДГВ вопросом является оптимизация энергетического баланса, обеспечивающая рациональное использование затрачиваемой на процесс электрической энергии. В рабо-



те [5] было показано, что основное влияние на степень извлечения раскисляющих, легирующих и рафинирующих элементов в железоуглеродистый расплав оказывают температура расходования рудно-восстановительного блока (РВБ) и толщина слоя рудно-восстановительной смеси (РВС), прогреваемого до температуры начала реакций их восстановления. Установленные в этой работе корреляционные зависимости позволяют утверждать, что для повышения эффективности обработки расплава по методу ДГВ необходимо иметь более высокую температуру расплава перед обработкой, а в составе РВС использовать компоненты с меньшими теплопроводностью, теплоемкостью и кажущейся плотностью. Причем теплопроводность выбрана как один из основных теплофизических параметров с увеличением, которого происходит рассеивание тепла по РВБ и, соответственно, меньшая его часть аккумулируется на реакционной поверхности, что затрудняет ее прогрев до температуры восстановления элементов и снижает степень их извлечения в расплав методом ДГВ.

Поэтому актуальными для метода ДГВ вопросами, которые не были изучены в ходе предыдущих исследований, являются перенос тепла в РВБ и распределение температуры по его высоте и сечению. Такая информация необходима для определения объема РВС, в которой могут возникать термодинамические условия для протекания реакций восстановления элементов.

В связи с этим *целью* настоящей работы явилась разработка математической модели и моделирование теплопереноса в процессе ДГВ.

**Объект исследования** — технология дугового глубинного восстановления.

**Предмет исследования** — теплоперенос от погруженной в объем расплава электрической дуги.

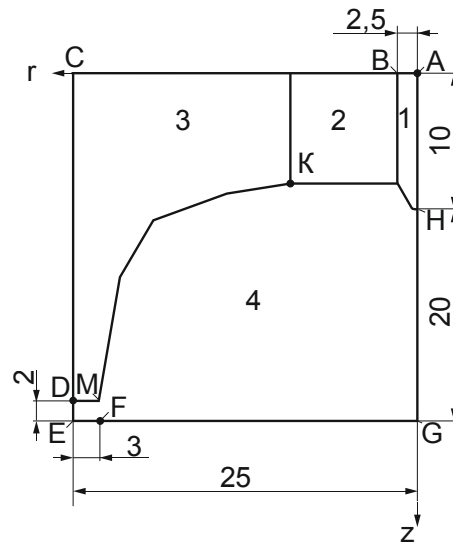
Основная задача настоящих исследований заключалась в математическом моделировании процесса ДГВ для определения величин температур, имеющих место на

реакционной поверхности каверны РВБ в результате дугового нагрева.

Для решения поставленной задачи было выполнено математическое моделирование процессов теплопереноса, имеющих место при карботермическом ДГВ марганца из силикомарганцевого шлака (ШМнС) с использованием лабораторной установки для обработки железоуглеродистых расплавов в ИСТ-0,06. Рабочие токи данной установки составляют порядка 300 А. Как показали предварительные электромагнитные расчеты, распределение тока в комбинированном электроде (КЭ) неравномерное: 93 % (280 А) его величины протекает по стенкам стальной трубки, а оставшаяся часть — через сердцевину, заполненную электродной смесью (ЭС) из графита с оксидом магния.

При разработке модели не учитывались процессы в катодной и анодной областях дуги, предполагалось, что дуга устойчива, плазма дуги находится в состоянии локального термодинамического равновесия, а распределение всех ее характеристик считается осесимметричным, принимается объемный характер излучения плазмы, не учитывается эффект Томсона. При моделировании были использованы термодинамические свойства воздушной плазмы атмосферного давления [6]. Предполагалось, что в плазме дуги будет содержаться достаточно большое количество легкоионизированных элементов (Fe, Mn, Mg, Ca, Al, Si и др. [7]), поэтому плазма считалась оптически тонкой. Также считалось, что при реализации процесса ДГВ температура стальной трубки КЭ на расстоянии 10–20 мм от ее нижнего торца близка к точке Кюри [1], в связи с этим магнитные свойства стали не учитывались. Аналогичное допущение принималось для всех металлов, входящих в состав РВБ.

Расчетная область моделирования с указанием основных геометрических размеров приведена на рисунке 1. Для обеспечения осевой симметрии стальная оболочка КЭ располагалась вдоль оси  $z$ .



1 — сталь; 2 — графит+MgO; 3 — ШМnC+C; 4 — газ

Рисунок 1— Схема расчетной области для моделирования процесса теплопереноса при ДГВ

Необходимо отметить, что заостренная форма стальной части КЭ с закруглением радиусом 0,5 мм обоснована в статье [8]. Там же приведены упрощения при использовании системы уравнений магнитной гидродинамики (МГД) для моделирования дуги при токах порядка  $10^2$  А.

При принятых допущениях и упрощениях базовые уравнения МГД модели стационарной дуги имеют вид:

– уравнение неразрывности потока:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0; \quad (1)$$

– уравнение движения:

$$\rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p - \frac{2}{3} \nabla (\eta \nabla \cdot \vec{v}) + 2 \nabla \cdot (\eta \dot{\epsilon}) + \vec{J} \cdot \vec{B}; \quad (2)$$

– уравнение энергии в газе:

$$\rho C_p (\vec{v} \cdot \nabla T) = \lambda \nabla^2 T + \frac{\vec{J}^2}{\sigma} - S_R, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>,  $\eta$  — вязкость, Па·с;  $\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К);  $p$  — давление, Па;  $T$  — температура, К;  $\vec{J}$  — плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $\vec{B}$  — магнитная индукция, Тл;  $S_R$  — объемная плотность потока излучения, Вт/м<sup>3</sup>.

В уравнении (2) тензор скоростей деформаций  $\dot{\epsilon}$  содержит компоненты:

$$\epsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right), \quad (4)$$

где  $v_i, v_k$  — компоненты вектора скорости  $\vec{v}$ ;  $x_i, x_k$  — координаты,  $i, k = 1, 2, 3$ .

Уравнения электромагнитного поля с использованием скалярного электрического потенциала  $\varphi$  и векторного магнитного потенциала  $\vec{A}$  запишутся в виде:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu_0} \nabla \cdot \vec{A} + \sigma \nabla \varphi = 0. \quad (6)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная,  $\sigma$  — электропроводность, См/м.

Подтверждение адекватности используемой МГД модели электрической дуги на основе уравнений (1–6) путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных приведено в работе [8].

Уравнение энергии для твердых тел можно записать в виде

$$\lambda \nabla^2 T + \frac{\vec{J}^2}{\sigma} = 0. \quad (7)$$

**МЕТАЛЛУРГИЯ**

Данные расчеты проводились с использованием основных граничных условий, приведенных в таблице 1.

Выбранные в таблице 1 граничные условия обусловлены следующими особенностями. Поверхности АВ, ВС, ЕF считались теплоизолированными. На поверхности CD задавалась постоянная температура, соответствующая температуре расплава перед обработкой вблизи боковой стенки РВБ (1800 К). Так как в данной работе уделено основное внимание передаче тепла в РВБ, на анодной поверхности FG температура также принималась постоянной (1900 К). На поверхности DE принято граничное условие типа outlet с заданием атмосферного давления на этой границе. Предполагалось, что через эту поверхность происходит выход газов, образующихся при ДГВ. На поверхностях HD, EF и GH налагалось условие прилипания. Также на поверхности HD для электрического потенциала и теплового потока использовались граничные условия четвертого рода, описанные в работе [8].

Моделирование данных процессов проводилось в пакете Star CCM+. При дискре-

тизации расчетной области (рис. 1) использовалась четырехугольная сетка с основным размером 0,1 мм. В области электрода, в анодной области и вдоль оси симметрии сетка дополнительно сгущалась до 0,01 мм. Общее количество элементов в сетке составило около 400000.

При моделировании термодинамические характеристики плазмы задавались в табличном виде [6]. Теплофизические параметры твердых тел считались постоянными и для стальной трубки, ЭС (графит + магнетит), а также РВС (ШМнС + графитовая стружка) приведены в таблице 2 на основании результатов работ [4, 5, 9–11].

Результаты моделирования распределения температуры, передаваемой от дуги на поверхность РВС, приведены на рисунке 2.

При силе рабочего тока 300 А с учетом отмеченного выше его распределения по КЭ (280 А — стальная трубка, 20 А — электродная смесь) плотности тока в стальной его части составляли  $2,3 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, увеличиваясь вблизи катодного пятна дуги до значений  $\sim 1 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup>.

Таблица 1

Граничные условия для различных участков расчетной области

Параметр	Участки расчетной области							
	AB	BC	CD	DE	EF	FG	GA	HD
$T$	$\partial T / \partial \vec{n} = 0$			1800 К	$\partial T / \partial \vec{n} = 0$	1900 К	$\partial T / \partial \vec{n} = 0$	–
$p$	–	–	–	0,1 МПа	–	–	$\partial p / \partial \vec{n} = 0$	–
$v$	–	–	–	$\partial \vec{v} / \partial \vec{n} = 0$	$\vec{v} = 0$		$\partial \vec{v} / \partial \vec{n} = 0$	$\vec{v} = 0$
$\varphi$	$\vec{J} \cdot \vec{n} = \frac{I}{S_m}$ $I = 280$ А		$\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} = 0$			$\varphi = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} = 0$	–
$A$	$\vec{A} \times \vec{n} = 0$						$\partial \vec{A} / \partial \vec{n} = 0$	–

Таблица 2

Теплофизические параметры элементов РВБ

Материал	Теплофизические свойства			
	Удельная проводимость	Теплопроводность	Плотность	Теплоемкость
	См/м	Вт/(м·К)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг·К)
Стальная трубка	$7 \cdot 10^5$	30	7000	700
ЭС	$0,5 \cdot 10^5$	60	1500	2000
РВС	10	2,4	2700	2302

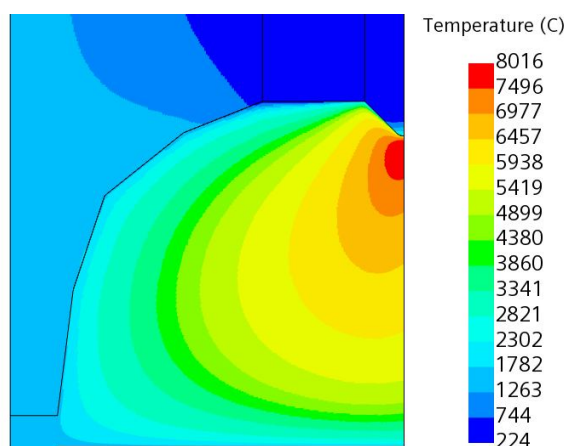


Рисунок 2 — График распределения температуры

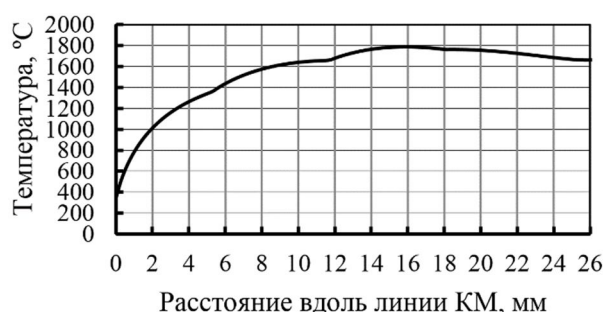
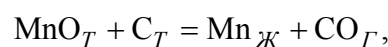


Рисунок 3 — График распределения температуры вдоль линии КМ (рис. 1)

При этом максимальная температура дуги составила около 8000 °С (рис. 2). По всей видимости, при таких значениях температуры будет наблюдаться неустойчивый режим горения дуги. Как и для большей части свободно горящих дуговых разрядов, полученное распределение температуры имеет «грушевидную» форму со стягиванием изотерм вблизи катода и с их расширением в области анода. Такое неравномерное распределение температур в столбе дуги также приводит к неравномерному нагреву РВБ. Так как основные восстановительные химические реакции протекают на границе между внутренней поверхностью каверны РВБ и газом (ломаная линия КМ на рис. 1), то целесообразно проанализировать распределение температуры вдоль этой линии (рис. 3) и сравнить ее с температурами начала восстановления извлекаемых в расплав элементов. Также

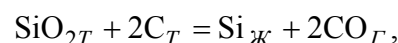
необходимо отметить, что представленный на рисунке 3 график распределения температуры имеет экстремумы при  $L = 5,3$  мм,  $L = 11,8$  мм  $L = 17,3$  мм. Это обусловлено тем, что полусферическая поверхность каверны РВБ задана в модели в виде ломаной линии КМ (рис. 1).

Расчетные температуры начала восстановления марганца и кремния из их оксидов и силиката твердым углеродом с использованием методики, приведенной в работе [12], составят:



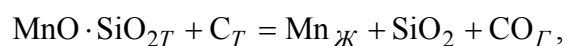
$$\Delta G^\circ = -578532 + 346,524 \cdot T,$$

$$T_{н.в.} = 1673 \text{ К (1400 } ^\circ\text{C)},$$



$$\Delta G^\circ = -748972 + 391,979 \cdot T,$$

$$T_{н.в.} = 1913 \text{ К (1640 } ^\circ\text{C)},$$



$$\Delta G^\circ = -705396 + 397,903 \cdot T,$$

$$T_{н.в.} = 1773 \text{ К (1500 } ^\circ\text{C)}.$$

Отличительной особенностью РВС на базе ШМnC является присутствие в ней марганца в виде силиката.

Поэтому на основании данных, иллюстрируемых рисунком 3, можно отметить, что на участке от 0 до 6 мм температура РВБ не достигает значений температуры начала реакций восстановления марганца из силиката, а на участке от 0 до 12 мм — кремния из кремнезема. Поэтому можно выдвинуть гипотезу, что в этих объемах РВБ восстановление отмеченных элементов практически невозможно и невосстановившаяся РВС в результате механического разрушения (расплавления) будет переходить в покровный шлак.

Выдвинутая гипотеза подтверждается результатами ДГВ марганца и кремния из ШМnC для обработки чугуна и стали [13]. В соответствии с рисунком 3 доля поверхности, на которой обеспечиваются термодинамические условия восстановления марганца, составляет около 70 %, а крем-

ния — 50 %. Следовательно, степень восстановления марганца и кремния должна быть в пределах этих величин. Средние фактические степени восстановления марганца и кремния, полученные при проведении лабораторных исследований и в ходе опытно-промышленного опробования технологии ДГВ, составили 73 % и 27 % соответственно. Причем более низкая степень восстановления кремния может быть связана с относительно низкой температурой металла перед обработкой, которая для условий восстановления марганца должна быть не менее 1500 °С, а для эффективного восстановления кремния ее значение должно быть не менее 1640 °С.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для обеспечения необходимой температуры на реакционной поверхности РВБ необходимо увеличивать мощность дуги. Однако для использованной лабораторной установки этот параметр был ограничен характеристиками применяемого оборудования. В этом случае можно предложить использование в непрогретаемой зоне балластной набивки, что приведет к увеличению количества образующегося шлака и удельных затрат электроэнергии на процесс. Второй путь предполагает изготовление двухслойного РВБ, в котором менее прогреваемый дугой центральный объем, граничащий с КЭ, будет набиваться РВС, рассчитанной на карботермическое извлечение элементов, имеющих более низкую температуру восстановления (хром, ванадий, титан (до карбида) и другие) [14].

В качестве основных выводов по результатам проведенных исследований можно отметить следующее:

– математическое моделирование теплопереноса в процессе ДГВ показало, что при использованных в модели граничных условиях не вся РВС прогревается до температуры начала карботермического восстановления марганца и кремния из ШМnC;

– ожидаемая степень извлечения марганца и кремния по результатам математического моделирования должна быть на уровне 70 % и 50 % соответственно, что близко к результатам средней степени восстановления марганца, полученной на опытных плавках (73 %) и практически в 2 раза превышает фактическую степень восстановления кремния. Более низкая степень извлечения кремния может быть связана с низкой температурой начала обработки расплава по методу ДГВ, которая была ориентирована на эффективное извлечение марганца и составляла около 1500 °С, а для извлечения кремния этот параметр должен быть не менее 1640 °С;

– для повышения эффективности процесса ДГВ необходимо рекомендовать увеличение мощности дуги или использование двухслойных РВБ, в которых промежуточный слой между КЭ и основной РВС может состоять из РВС, включающей оксиды элементов, требующих меньшую в сравнении с силикатом марганца температуру начала карботермического восстановления.

В ходе дальнейших исследований предполагается усовершенствование используемой математической модели с целью изучения особенностей теплообмена в процессе ДГВ, в том числе при различных режимах горения электрической дуги.

#### **Список источников**

1. Концепция технологического развития на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р. URL: <https://rospatent.gov.ru/content/uploadfiles/technological-2023.pdf> (дата обращения: 14.10.2023).

2. Об утверждении Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г. : распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4260-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405963845/> (дата обращения: 14.10.2023).

3. Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 31 декабря 2020 г. № 3684-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/skzO0DEууFOIBtXobzPA3zTyC71cRAOi.pdf> (дата обращения: 14.10.2023).

4. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов : монография / А. Н. Смирнов [и др.]. Алчевск : ДонГТУ, 2013. 320 с.

5. Куберский С. В. Оценка влияния теплофизических параметров рудно-восстановительных блоков на эффективность процесса дугового глубинного восстановления // Новые технологии и проблемы технических наук : сборник научных трудов по итогам междунар. науч.-практ. конф., г. Красноярск, 10 ноября 2015 г. Красноярск : ИЦРОН, 2015. № 2. С. 50–58.

6. Boulos M., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas: fundamentals and applications. Vol. 1. New York: Plenum press, 1994. 452 p.

7. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга. М. : Машиностроение, 1970. 336 с.

8. Кухарев А. Л. Моделирование электрической дуги на базе уравнений магнитной гидродинамики // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2023. Вып. 30 (73). С. 37–46.

9. Исследование влияния состава электродной смеси на её удельное электросопротивление / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, М. И. Воронько, В. И. Проценко // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2018. Вып. 10 (53). С. 70–75.

10. Галяпа А. Г., Проценко М. Ю. Исследование электросопротивления рудно-восстановительной смеси для дугового глубинного восстановления элементов // Тезисы докладов XII науч.-техн. конф. молодых специалистов ОАО «АМК», г. Алчевск, 25 мая 2012 г. Алчевск : ОАО «АМК», 2012. С. 15–16.

11. Bowman V., Kruger K. Arc furnace physics. Dusseldorf : Stahleisen communications, 2009. 245 p.

12. Казачков Е. А. Расчеты по теории металлургических процессов : учеб. пособ. для вузов. М. : Металлургия, 1988. 288 с.

13. Куберский С. В. Анализ параметров метода дугового глубинного восстановления при одновременной обработке расплава двумя рудно-восстановительными блоками // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2017. Вып. 7 (50). С. 79–85.

14. Гасик М. И., Лякишев Н. П. Физикохимия и технология электроферросплавов : учебник для вузов. Днепрпетровск : ГНПП «Системные технологии», 2008. 453 с.

© Кухарев А. Л., Куберский С. В., Кононенко Г. И.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Денищенко П. Н.,  
ведущим инженером технического отдела управления ООО «ЮГМК» Великоцкий Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 18.10.2023.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Кухарев Алексей Леонидович**, д-р техн. наук, профессор каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

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

**Кононенко Геннадий Иосифович**, аспирант каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

**Kukharev A. L., \*Kuberskiy S. V., Kononenko G. I.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, \*e-mail: Skuberskiy@yandex.ru)

### MODELING OF THE HEAT TRANSFER PROCESS DURING ARC DEEP RECOVERY

A mathematical model is developed to estimate heat transfer parameters at the arc deep recovering of elements from the silico-manganese slag into iron-carbon liquid-alloy. It is shown that under the used boundary conditions not all reactive surface of the ore-reduction unit is warmed up to the onset temperature of carbothermic recovery of manganese and silicon. The results were well consistent with the results of the pilot-industrial technology testing. Ways for increasing the efficiency of the ADR process, by increasing the degree of elements extraction from the oxide ore-reduction mixtures have been proposed.

**Key words:** technogenic waste, recycling, deoxidation-alloying, iron-carbon liquid-alloy, electric arc, recovery, mathematical model, heat transfer, temperature distribution, degree of extraction.

### References

1. Concept of technological development for the period up to 2030: adopt. by Order of the Government of the Russian Federation dated May 20, 2023. No 1315-p. [Konceptsiya tekhnologicheskogo razvitiya na period do 2030 goda: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Ros. Federacii ot 20 maya 2023 g. № 1315-r]. URL: <https://rospatent.gov.ru/content/uploadfiles/technological-2023.pdf> (date of treatment: 14.10.2023).
2. On approval of the Strategy for the development of metallurgical industry of the Russian Federation for the period up to 2030: Order of the Government of the Russian Federation dated December 28, 2022. No 4260-p [Ob utverzhdenii Strategii razvitiya metallurgicheskoy promyshlennosti RF na period do 2030 g.: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28 dekabrya 2022 g. № 4260-r]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405963845/> (date of treatment: 14.10.2023).
3. The Russian Federation's long-term scientific research program (2021–2030): adopt. by Order of the Government of the Russian Federation dated December 31, 2020. No 3684-p. [Programma fundamental'nyh nauchnyh issledovaniy v Rossijskoj Federacii na dolgosrochnyj period (2021–2030 gody): utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Ros. Federacii ot 31 dekabrya 2020 g. № 3684-r]. URL: <http://static.government.ru/media/files/skzO0DEvyFOIBtXobzPA3zTyC71cRAOi.pdf> (date of treatment: 14.10.2023).
4. Smirnov A. N. [et.al] Electric arc and electromagnetic melt treatment: monograph [Elektrodugovaya i elektromagnitnaya obrabotka rasplavov: monografiya]. Alchevsk: DonSTU. 2013. 320 p. (rus)
5. Kuberskiy S. V. Assessing the influence of thermal parameters of ore reduction blocks on the efficiency of the arc depth reduction process [Ocenka vliyaniya teplofizicheskikh parametrov rudno-vosstanovite'nyh blokov na effektivnost' processa dugovogo glubinnogo vosstanovleniya]. Novye tekhnologii i problemy tekhnicheskikh nauk: sbornik nauchnyh trudov po itogam mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Krasnoyarsk. 10 noyabrya 2015. Krasnoyarsk: IDCES, 2015. No 2. Pp. 50–58. (rus)
6. Boulos M., Fauchais P., Pfender E. Thermal plasmas: fundamentals and applications. New York: Plenum press, 1994. Vol. 1. 452 p.
7. Leskov G. I. Electric welding arc [Elektricheskaya svarochnaya duga]. M.: Mechanical Engineering, 1970. 336 p. (rus)
8. Kukharev A. L. Electrical arc simulation based on magnetic hydrodynamics equations [Modelirovanie elektricheskoy dugi na baze uravnenij magnitnoj gidrodinamiki]. Scientific works collection of DonSTU. 2023. Iss. 30 (73). Pp. 37–46. (rus)
9. Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Protsenko V. I. Studying the influence of the electrode mixture's composition on its specific electrical resistance [Issledovanie vliyaniya sostava elektrodnoj smesi na eyo udel'noe elektrosoprotivlenie]. Scientific works collection of DonSTU. 2018. Iss.10 (53). Pp. 70–75. (rus)
10. Galyapa A. G., Protsenko M. Yu. Studying the electroresistance of the ore-reducing mixture for arc depth recovery of elements [Issledovanie elektrosoprotivleniya rudno-vosstanovitel'noj smesi dlya dugovogo glubinnogo vosstanovleniya elementov]. Tezisy dokladov XII nauch.-tekhn. konf. molodyh

specialistov OAO "Alchevsk Iron-and-Steel Works". Alchevsk. 25 May 2012. Alchevsk: OAO "Alchevsk Iron-and-Steel Works". 2012. Pp. 15–16. (rus)

11. Bowman B., Kruger K. *Arc furnace physics*. Dusseldorf: Stahleisen communications, 2009. 245 p.

12. Kazachkov E. A. *Calculations on the theory of metallurgical processes: study letter for universities [Raschety po teorii metallurgicheskikh processov: ucheb. posob. dlya vuzov]*. M.: Metalurgija, 1988. 288 p. (rus)

13. Kuberskiy S. V. *Analyzing the parameters of the arc deep recovery method by melt processing with two ore-reducing blocks simultaneously [Analiz parametrov metoda dugovogo glubinnogo vosstanovleniya pri odnovremennoj obrabotke rasplava dvumya rudno-vosstanovitel'nymi blokami]*. Scientific works collection of DonSTU. 2017. Iss. 7 (50). Pp. 79–85. (rus)

14. Gasik M. I., Lyakishev N. P. *Physics and Technology of Electroferroalloys: textbook for universities [Fizikohimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov: uchebnik dlya vuzov]*. Dnepropetrovsk: SRDE "System Technologies", 2008. 453 p. (rus)

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Kukharev Alexei Leonidovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

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

**Kononenko Gennady Iosiphovich**, Postgraduate of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia



УДК 621.983

*\*Митичкина Н. Г., Космина А. В.**Донбасский государственный технический университет**\*E-mail: ng\_mitichkina@mail.ru*

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ПРОБИВКИ ОТВЕРСТИЯ В УСЛОВИЯХ СОВМЕЩЕННОЙ ШТАМПОВКИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ

*На основании обзора литературы проанализированы способы пробивки отверстий, применяемые в совмещенных штампах. На базе лаборатории ОМД ДонГТУ проведены экспериментальные исследования процесса пробивки отверстий эластичной средой по клиновому ребру с разным углом заострения и классическим способом. Выполнен сравнительный анализ поверхности среза клиновым пробивным элементом отверстия и отхода, а также поверхности среза, полученной классическим способом. Исследования показали, что поверхности среза отличаются механизмом разделения и внешними признаками. Основными факторами, влияющими на пробивку жестким инструментом, являются зазор между пуансоном и матрицей и род пробиваемого материала, а при пробивке эластичной средой — род материала, жесткость эластичной среды и угол заострения клинового пробивного элемента. Оптимальным при пробивке по клиновому ребру является угол заострения 45 градусов, срез при этом отличается значительной пластической деформацией в зоне реза и утонением. Большая пластическая деформация приводит к дополнительному упрочнению кромки отверстия, что снижает пластичность и в дальнейшем может привести к потере устойчивости во время процесса отгибки.*

**Ключевые слова:** *пробивка, совмещенная штамповка, вырубка, вытяжка, отбортовка, отгибка, штамп, пуансон, матрица, эластичная среда, клиновые ребра, пластическая деформация, трещины скалывания, заусенцы, изгибающий момент.*

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Пробивка — одна из наиболее применяемых операций листовой штамповки. Часто она используется в совмещенных штампах, где за один ход пресса выполняются две и более операции, например: вырубка и пробивка; вырубка, вытяжка и пробивка; пробивка и отбортовка и т. д. Совмещение операций позволяет получать более точные изделия при высокой производительности процесса [1].

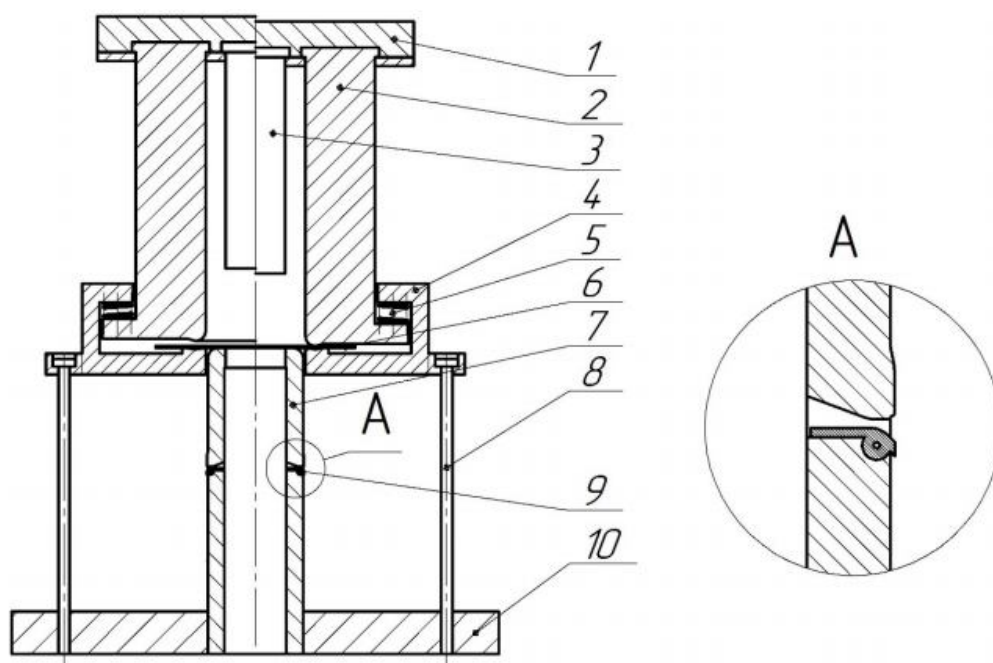
Ранее авторами был предложен совмещенный способ штамповки трубных заготовок ограниченной длины [2]. Способ содержит следующие переходы: вырубку, штамповку трубной заготовки и обрезку. Для штамповки трубной заготовки ограниченной длины предложен штамп совмещенного действия (рис. 1). В нем происходят вытяжка, пробивка дна, отгибка и протяжка за один ход пресса.

**Постановка задачи.** Для получения ровной и качественной поверхности торца

трубной заготовки ограниченной длины в штампе совмещенного действия необходимо выбрать наиболее рациональный способ пробивки на основе анализа литературных данных и экспериментальных исследований.

**Изложение материала.** В процессе штамповки трубной заготовки ограниченной длины происходит пробивка дна, а затем его отгибка, т. е. очень важной составляющей является чистота поверхности получаемого пробивкой отверстия, т. к. в дальнейшем, в процессе отгибки дна, отверстие будет претерпевать деформации тангенциального растяжения и нормального сжатия.

В совмещенных процессах применяют следующие виды пробивки: жестким инструментом с плоской поверхностью (классический способ), жестким инструментом с применением клиновых ребер и с помощью эластичной среды, когда один из рабочих инструментов, пуансон или матрицу заменяют эластичной средой (резиной, полиуретаном, жидкостью или газом).



1 — верхняя плита штампа; 2 — вытяжная матрица с перетяжным ребром; 3 — пробивной пуансон; 4 — прижим; 5 — пружины; 6 — заготовка; 7 — пуансон-матрица; 8 — ограничитель вертикального перемещения; 9 — сьемник; 10 — нижняя плита штампа

Рисунок 1 — Схема конструкции штампа совмещенного действия для получения трубной заготовки (начальный момент и момент прижима заготовки)

Рассмотрим каждый вид подробнее.

При пробивке жестким инструментом (классический способ) пуансон и матрица выполнены жесткими и расположены друг относительно друга с зазором, который выбирается в зависимости от толщины и вида пробиваемого материала [3].

В операциях разделения жестким инструментом участвуют две режущие кромки, вблизи которых возникают локальные очаги пластической деформации. По мере перемещения инструмента пластическая деформация охватывает всю толщину материала заготовки, начинается сдвиг ее частей, зарождаются трещины скалывания, которые распространяются навстречу друг другу и встречаются при оптимальном технологическом зазоре.

Достоинством способа является простота исполнения и хорошая применимость в штампах совмещенного действия. К недостаткам можно отнести наличие микротрещин, сколов, заусенцев на поверхности сре-

за при выработке инструмента или неточности выбора зазора или настройки штампа.

Для повышения качества среза применяют пробивной элемент в виде клиновидного ребра [4–8]. Полученное таким образом отверстие обладает срезом повышенного качества, однако стойкость таких ребер невысока и необходимо продумывать их материал, вид изготовления и упрочнения.

При штамповке с использованием эластичной среды [9] происходит процесс разделения металла между жестким пуансоном или жесткой матрицей и эластичной средой в виде полиуретана, резины и т. д. Разделение материала осуществляется только на одной режущей кромке, что вносит существенные изменения в механизм деформирования. Режущая кромка жесткого инструмента внедряется в тело заготовки и вблизи нее возникает очаг пластической деформации. Однако этот очаг локализован и не распространяется на всю толщину заготовки. Под действием давле-

ния эластичного материала часть заготовки прогибается, возникают изгибающий момент, растягивающая сила и контактные касательные напряжения, которые приводят к появлению растягивающих меридиональных напряжений, действующих вдоль листа. Уменьшение поперечного сечения заготовки, вызванное его утонением за счет внедрения режущей кромки, приводит к увеличению растягивающего напряжения. При достижении величины, превышающей напряжение текучести, соответствующее образованию локальной шейки, происходит обрыв заготовки [10]. Поверхность среза отличается неровностью, имеет утяжины и зону скола.

В некоторых случаях для получения отверстий под отгибку эластичной средой применяются пробивные элементы клиновидной формы. Отверстие, полученное таким способом, имеет более качественную поверхность и не требует дополнительной обработки. Это создает благоприятные условия для последующего процесса отбортовки или отгибки [11], что требует

уточнения ввиду применимости в рассматриваемом штампе.

Для уточнения аналитически полученных сведений на базе лаборатории ОМД ДонГТУ проведены экспериментальные исследования процесса пробивки отверстий эластичной средой по клиновому ребру с разным углом заострения и классическим способом. Материал заготовки — алюминий марки А3, толщиной 0,7 и 0,95 мм, диаметр пробиваемого отверстия — 10 мм и 15 мм, клиновые ребра с углом заострения 30, 45 и 60 градусов, в качестве эластичной среды использовалась резина марки 3826. С помощью инструментального микроскопа марки МПБ-3 (увеличение 25×) и визуально были изучены и сравнены поверхности среза клиновым пробивным элементом отверстия и отхода, а также поверхности среза, полученные классическим способом.

На рисунках 2–6 представлены отходы и поверхности среза для пробивки заготовок эластичной средой с различными углами заострения клиновидного ребра.

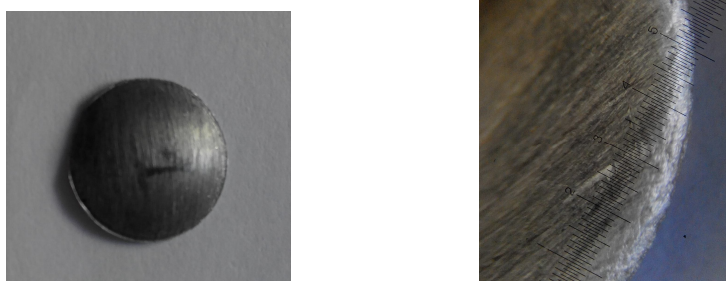


Рисунок 2 — Вид и качество среза отхода № 1 после пробивки (диаметр 15 мм, толщина материала 0,7 мм, угол заострения клиновидного ребра 45°)

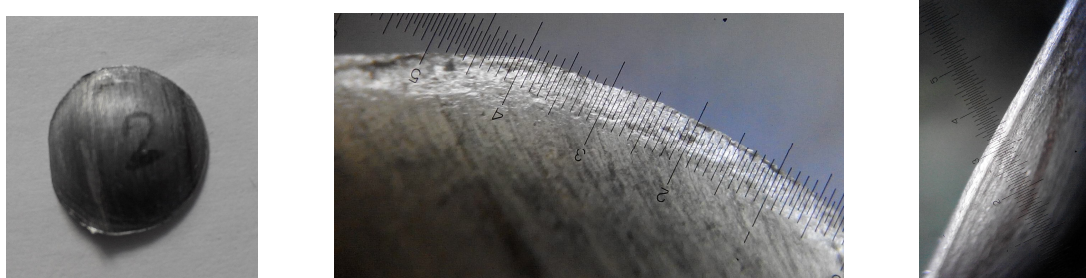


Рисунок 3 — Вид и качество среза отхода № 2 после пробивки (диаметр 15 мм, толщина материала 0,7 мм, угол заострения клиновидного ребра 60°)

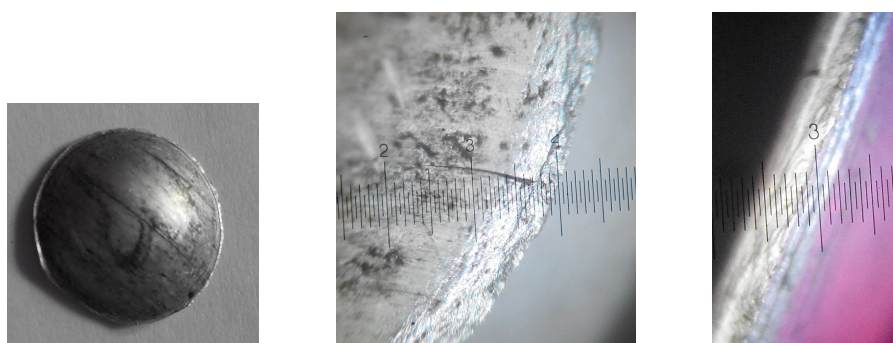


Рисунок 4 — Вид и качество среза отхода № 3 после пробивки (диаметр 15 мм, толщина материала 0,95 мм, угол заострения клинового ребра 45°)

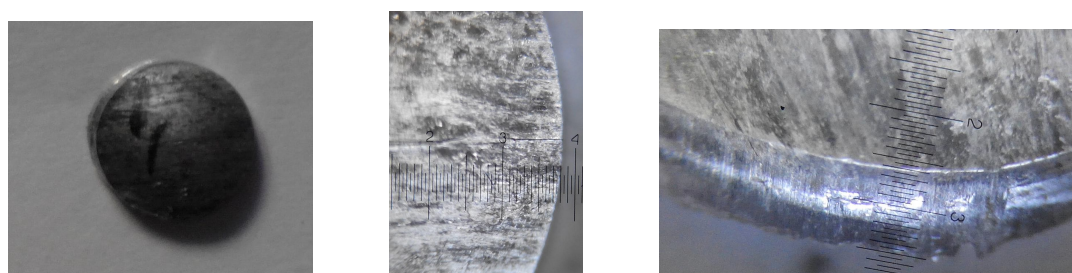


Рисунок 5 — Вид и качество среза отхода № 4 после пробивки (диаметр 10 мм, толщина материала 0,95 мм, угол заострения клинового ребра 30°)

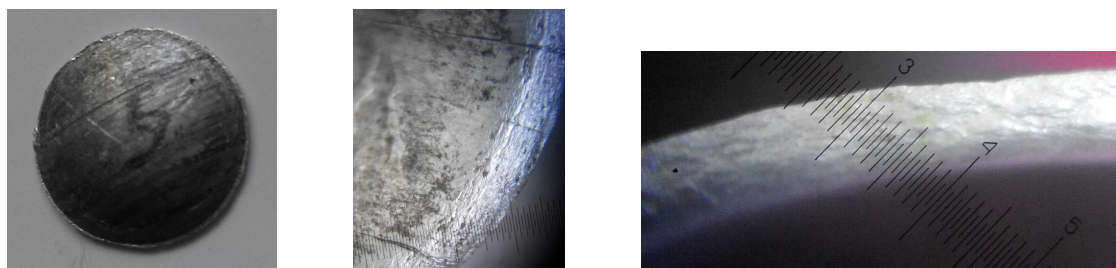
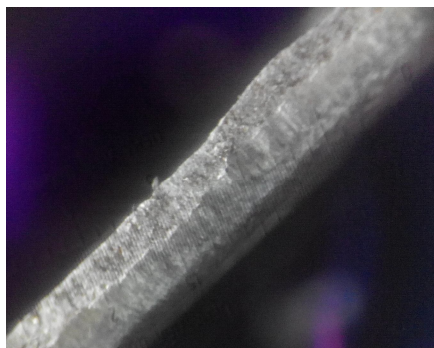


Рисунок 6 — Вид и качество среза отхода № 5 после пробивки (диаметр 15 мм, толщина материала 0,95 мм, угол заострения клинового ребра 60°)

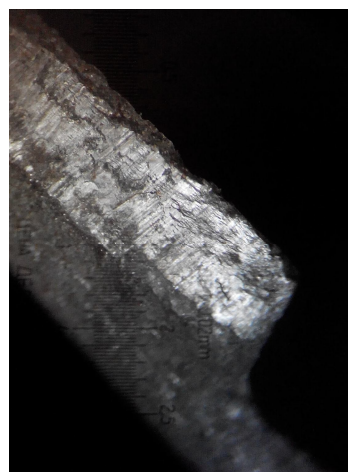
Исследования показали, что срез, получаемый при пробивке эластичной средой и клиновым ребром, имеет ярко выраженное утонение, которое возникает вследствие появления шейки во время взаимодействия эластичной среды с жестким инструментом, и происходит «обкусывание» по контуру возникающей шейки. При этом вид среза практически отличается только толщиной зоны пластической деформации. Углы заострения 30° и 45° показали аналогичные результаты, тогда как стойкость ре-

бра с углом заострения 30° ниже, чем с углом 45°. Угол заострения 60° неэффективен из-за большой утяжки материала, при этом ширина зоны блестящего пояса (зоны резания) составила приблизительно 55 %, тогда как при 45° — 67 %, а при 30° — 69 %. Срез же при пробивке классическим способом имеет значительную зону скола, не имеет утяжины, в нем не наблюдается эффекта образования шейки, однако при большом зазоре появляется втягивание и заусенец (рис. 7).





а



б

Рисунок 7 — Вид среза при пробивке классическим способом: а) срез; б) заусенец (диаметр 15 мм, толщина материала 0,95 мм)

### Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Исследования показали, что при использовании пробивки классическим способом поверхность среза зависит от применяемого зазора, материала заготовки, как и отмечено во многих источниках. При этом значительной является поверхность скола, на которой отмечаются неровности и микротрещины, что при дальнейшей отбортовке или отгибке дна может служить как концентратор напряжений для появления трещин. Большая величина зазора или выработка режущей поверхности инструмента приводит к появлению заусенцев.

2. Пробивка эластичной средой по клиновому ребру показывает, что оптималь-

ным углом является угол 45 градусов (как и показано в работах ранее), срез при этом отличается значительной пластической деформацией в зоне реза и утонением.

3. Большая пластическая деформация приводит к дополнительному упрочнению кромки отверстия, что снижает пластичность и в дальнейшем может привести к потере устойчивости во время процесса отгибки.

Таким образом, предпочтительной является в данном случае пробивка классическим способом или жестким инструментом по клиновому ребру, так как поверхности среза в этом случае не будут иметь дополнительного утонения и упрочнения и могут быть без усложнения конструкции штампа применены в совмещенной штамповке.

### Список источников

1. Попов Е. А. *Технология и автоматизация листовой штамповки* : учеб. для вузов. М. : МГТУ, 2003. 480 с.
2. Митичкина Н. Г., Токарев А. В. Совершенствование способа получения трубной заготовки методом холодной штамповки // *Сборник научных трудов ДонГТИ*. 2021. № 22 (65). С. 52–57.
3. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке*. 6-е изд., перераб. и доп. Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. 520 с.
4. Митичкина Н. Г., Бут А. Ю. Совершенствование процесса пробивки отверстий под ответвления соединительных элементов трубопроводов в условиях однопереходной штамповки // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. Краматорск : ДГМА, 2011. № 4 (29). С. 137–141.
5. Штмп совмещенного действия для образования отверстия и отбортовки : а. с. 1074632 СССР / Шевченко В. Ф. ; № 709218 ; заявл. 29.10.82 ; опубл. 23.02.84, Бюл. № 7. 3 с.

6. Штамп совмещенного действия для пробивки и отбортовки : а. с. 1258566 СССР / Шевченко В. Ф. ; № 1074632 ; заявл. 10.04.85 ; опубл. 23.09.86, Бюл. № 35. 3 с.

7. Штамп совмещенного действия : а. с. 1260072 СССР / Шевченко В. Ф. ; № 1074632 ; заявл. 15.03.85 ; опубл. 30.09.86, Бюл. № 36. 2 с.

8. В 21 D 37/00, В 21 D 35/00. Штамп совмещенного действия : а. с. 1423230 СССР / Шевченко В. Ф. ; № 1074632 ; заявл. 16.02.87 ; опубл. 15.09.88, Бюл. № 34. 3 с.

9. Митичкина Н. Г., Бут А. Ю. Исследование процесса получения отверстий под оформление ответвлений труб // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2012. № 9. С. 12–15.

10. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 1989. 304 с.

11. Бут А. Ю. Совершенствование процесса штамповки тройников эластичной средой на основе совмещения технологических операций : дис. ... канд. техн. наук. Алчевск, 2014. 220 с.

© Митичкина Н. Г., Космина А. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Должиковым В. В., к.т.н., доц., пом. нач. СПЦ по технологии ООО «ЮГМК» Чичкан А. А.**

Статья поступила в редакцию 25.10.2023.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Митичкина Наталия Геннадиевна**, канд. техн. наук, доцент, и. о. зав. каф. металлургических технологий

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,

e-mail: ng\_mitichkina@mail.ru

**Космина Алена Викторовна**, аспирант каф. металлургических технологий

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,

e-mail: alona\_kosmina@mail.ru

\***Mitichkina N. G., Kosmina A. V.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, \*e-mail: ng\_mitichkina@mail.ru)

#### **SELECTING A RATIONAL METHOD FOR PUNCHING THE HOLE UNDER THE DOUBLE-ACTION FORMING OF PIPE BLANKS WITH LIMITED LENGTH**

The analysis of the literature reveals the methods used to punch holes in combined dies. On the basis of the MF laboratory of FSBEI HE "DonSTU" experimental studies were conducted on the process of punching holes in elastic medium on a wedge rib using a different angle of sharpening and a classic method. A comparison has been made between the cutting surface with a wedge-shaped punching element for boring and offscouring, and the cutting surface obtained by the classical method. Studies have shown that the cut surfaces are distinguished by a separation mechanism and external admissions. The main factors influencing punching rigid tool are the gap between the punch, matrix and the type of punched material, as well punching elastic medium — the type of material, the rigidity of elastic medium and the angle of sharpening of the wedge-shaped punching element. The wedge rib is punched at an optimal angle of 45 degrees, and the cut is marked by significant plastic deformation in the cutting area and thinning. Large plastic deformation leads to additional reinforcement of the boring edge, which reduces ductility and can later lead to loss of stability during the bending process.

**Key words:** punching, double-action forming, blanking, drawing, flanging, bending, die, punch, matrix, elastic medium, wedge ribs, plastic deformation, cleavage cracks, burrs, bending moment.

## References

1. Popov E. A. *Technology and automation of sheet forging: textbook [Tekhnologiya i avtomatizaciya listovoj shtampovki: ucheb. dlya vuzov]*. M.: MSTU, 2023. 480 p. (rus)
2. Mitichkina N. G., Tokarev A. V. *Improving the method for producing a pipe blank by cold punching [Sovershenstvovanie sposoba polucheniya trubnoj zagotovki metodom holodnoj shtampovki]*. Scientific works collection of DonSTU. 2021. No. 22 (65). Pp. 52–57. (rus)
3. Romanovskiy V. P. *Cold punching handbook. 6th edition. rev. ed. [Spravochnik po holodnoj shtampovke. 6-e izd., pererab. i dop.]*. L.: Mechanical Engineering. Leningr. otd-nie, 1979. 520 p. (rus)
4. Mitichkina N. G., But A. Yu. *Improve the process of punching borings for the branch of pipeline connecting elements under single-pass punching conditions [Sovershenstvovanie processa probivki otverstij pod otvetvleniya soedinitel'nyh elementov truboprovodov v usloviyah odnoperekhodnoj shtampovki]*. Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov. Kramatorsk: DonSMA, 2011. No. 4 (29). Pp.137–141. (rus)
5. Shevchenko V. F. *Combined action die for boring and crease: a. s. 1074632 USSR. No 709218; submitted 29.10.82; published 23.02.84, bulletin No. 7. 3 p. (rus)*
6. Shevchenko V. F. *Combined action die for punching and crease: a. s.1258566 USSR. No 1074632; submitted 10.04.85; published 23.09.86, bulletin No. 35. 3 p. (rus)*
7. Shevchenko V. F. *Combined action die: a. s. 1260072 USSR. No. 1074632; submitted 15.03.85; published 30.09.86, bulletin No. 36. 2 p. (rus)*
8. Shevchenko V. F. *B 21 D 37/00, B 21 D 35/00. Combined action die: a. s. 1423230 USSR. No. 1074632; submitted 16.02.87; published 15.09.88, bulletin No. 34. 3 p. (rus)*
9. Mitichkina N. G., But A. Yu. *Studying the process of obtaining borings for the branch pipes design. [Issledovanie processa polucheniya otverstij pod oformlenie otvetvlenij trub]*. Die forging. Metal forming. 2012. No. 9. Pp.12–15. (rus)
10. Averkiev Yu. A. *Technology of cold punching: textbook [Tekhnologiya holodnoj shtampovki]*. M.: Mechanical Engineering, 1989. 304 p. (rus)
11. But A. Yu. *Improvement of tee-joints punching process with elastic environment based on combination of technological operations: thesis of PhD in Engineering. [Sovershenstvovanie processa shtampovki trojnikov elastichnoj sredoj na osnove sovmeshcheniya tekhnologicheskikh operacij: dis. ... kand. tekhn. nauk]*. Alchevsk, 2014. 220 p. (rus)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Mitichkina Natalia Gennadievna**, PhD in Engineering, Assistant Professor, Acting Head of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,  
e-mail: ng\_mitichkina@mail.ru

**Kosmina Alena Viktorovna**, Postgraduate of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,  
e-mail: alona\_kosmina@mail.ru

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

---

**MECHANICAL ENGINEERING**





УДК 621.791

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

## РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Работа посвящена анализу условий формирования типичного строения структуры неразъемных соединений, получаемых различными методами сварки с разным характером преобразования веществ в зоне соединения. Рассмотрено три вида сварочных процессов: сварка плавлением, сварка давлением и сварка трением с перемешиванием. Показана необходимость совершенствования классификации сварочных процессов и выделения способов сварки трением с перемешиванием в отдельную группу. Рассмотрены основные преимущества и недостатки методов сварки трением с перемешиванием.*

**Ключевые слова:** зоны сварных швов, образование связей между соединяемыми материалами, сварка плавлением, сварка давлением, сварка трением с перемешиванием, стадии образования сварных швов, сварные соединения.

При производстве различных изделий широкое применение получила сварка конструкционных материалов. Понятие сварки объединяет разнообразные методы получения монолитных неразъемных соединений. Монолитность сварных соединений обеспечивается созданием атомно-молекулярных связей между элементарными частицами соединяемых твердых тел [1, 2]. Процессы сварки протекают при наличии в зоне соединения двух основных физических явлений: введения и преобразования энергии; движения (превращения) веществ. При классификации сварочных процессов принято выделять три основных физических признака: наличие давления, вид вводимой энергии и вид инструмента — носителя энергии. Для отдельных методов сварки дополнительно используют технические и технологические признаки. По физическим признакам принято различать методы сварки плавлением и сварки давлением.

Сварка для микроучастков соединяемых поверхностей отличается двухстадийностью процесса образования прочных связей между атомами соединяемых веществ [1]: 1. Образование физического контакта, т. е. сближение соединяемых веществ на расстояния, требуемые для межатомного взаимодействия; 2. Стадия химического взаимодействия, заканчивающаяся образованием

прочного соединения. Для качественного соединения материалов необходимо обеспечить контакт по большей части стыкуемых поверхностей и активизировать их. Активация поверхности заключается в сообщении поверхностным атомам твердого тела некоторой энергии, необходимой: а) для обрыва связей между атомами тела и атомами внешней среды, насыщающими их свободные связи; б) для повышения энергии поверхностных атомов до уровня энергетического барьера схватывания. Энергия активации может в общем случае сообщаться в виде теплоты (термическая активация), упруго-пластической деформации (механическая активация), электронного, ионного и других видов облучения (радиационная активация).

При взаимодействии жидких или газообразных фаз (при сварке плавлением) состояние физического контакта легко достигается за счет их высокой подвижности. При любых способах соединения в твердой фазе физический контакт осуществляется за счет пластической деформации приконтактных объемов обоих или одного из соединяемых материалов.

Рассмотренные выше особенности взаимодействия соединяемых материалов в зоне их контакта привели к классификации сварочных процессов, с разделением их на

две основные группы: сварка плавлением и сварка давлением. Представления о механизмах сваривания конструктивных материалов являются основой для развития соответствующих технологий и оборудования, а также рекомендаций по проектированию сварных конструкций.

**Цель данной статьи** заключается в анализе и сопоставлении особенностей строения и структуры сварных швов, а также оценке возможных направлений развития сварочных процессов в машиностроении и ремонтном производстве.

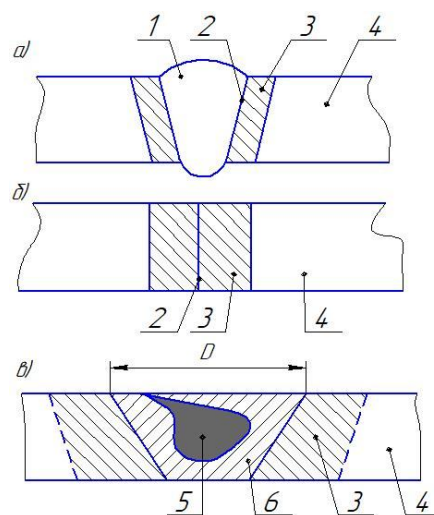
**Особенности формирования структуры соединения при сварке плавлением.** Формирование сварного соединения при сварке плавлением сопровождается сложными диффузионными процессами в жидкой и твердой фазах, которые приводят к изменению химического состава в различных зонах, выделению или перераспределению примесей и легирующих элементов. Сварные соединения, выполненные сваркой плавлением, можно разделить на несколько зон, отличающихся химическим составом, макро- и микроструктурой, другими признаками [1, 2]: сварной шов, зону сплавления, зону термического влияния и основной металл (рис. 1, а).

**Сварной шов** характеризуется литой макроструктурой металла. Ему присуща первичная микроструктура кристаллизации, тип которой зависит от условий кристаллизации шва (химического состава шва и условий фазового перехода из жидкого состояния в твердое).

Сварной шов характеризуется литой структурой первичной кристаллизации. Согласно теории гетерогенного зародышеобразования, хорошее смачивание подложки расплавом способствует образованию центров кристаллизации, поскольку подложка содержит частично расплавленные зерна основного металла. В зависимости от формы и расположения кристаллитов затвердевшего металла различают равноосную, столбчатую и дендритную структуру. При равноосной структуре зерна обычно не имеют опре-

деленной ориентации. Такая структура характерна для металла шва при его довольно быстром охлаждении, а столбчатая и дендритная структура — для швов при медленном охлаждении. Направление роста кристаллов связано с интенсивностью отвода теплоты от ванны жидкого металла.

Кристаллы растут перпендикулярно к границе сплавления в направлении, противоположном потоку тепла. Существуют различные классификации сварочных макроструктур, наблюдаемых в процессах сварки плавлением. Практически все макроструктуры характеризуются наличием столбчатой зоны, которая может дополняться центральной зоной равноосных зерен. Поскольку расплав металла при сварке находится в турбулентном движении, существует неподвижный слой жидкого металла по краям ванны. Эта область характеризуется свойствами, отличными от свойств большей части сваренного металла, и может являться местом возникновения микротрещин, а также повышенной коррозионной чувствительности.



1 — сварной шов (а); 2 — зона сплавления (а) или соединения при сварке давлением (б); 3 — зона термического влияния; 4 — прилегающий основной материал; 5 — ядро (в); 6 — зона механотермического влияния (в); D — диаметр заплечика инструмента

Рисунок 1 — Схемы расположения характерных зон сварных соединений

**Зона термического влияния (ЗТВ)** — участок основного металла, примыкающий к сварному шву, в пределах которого вследствие теплового воздействия источника нагрева протекают фазовые и структурные превращения в твердом металле. В результате этого ЗТВ имеет отличные от основного металла величину зерна и вторичную микроструктуру. Часто выделяют околошовный участок ЗТВ, или околошовную зону (ОШЗ), которая располагается непосредственно у сварного шва и включает несколько рядов крупных зерен, в том числе оплавленных. Металл шва, имеющий литую макроструктуру, и ЗТВ в основном металле, содержащем макроструктуру проката или рекристаллизованную макроструктуру литой или ковальной заготовки, разделяются друг от друга поверхностью сплавления. На поверхности шлифов, вырезанных из сварного соединения и подвергнутых травлению реактивами, она при небольших увеличениях наблюдается как линия или граница сплавления.

**Зона сплавления (ЗС)** — это зона сварного соединения, где происходит сплавление наплавленного и основного металла. В нее входит узкий участок шва, расположенный у линии сплавления, а также оплавленный участок ОШЗ. Первый участок образуется вследствие недостаточно эффективного переноса расплавленного основного металла в центральные части сварочной ванны. Здесь имеет место перемешивание наплавленного и основного металлов в соизмеримых долях. На оплавленном участке ОШЗ возможно появление между оплавленными зернами жидких прослоек, имеющих аналогичный состав. В случае применения разнородных наплавленного и основного металлов (например, аустенитного и перлитного) ЗС отчетливо наблюдается в виде переходной прослойки. Она имеет часто существенно отличающиеся от металла шва и ЗТВ химический состав, вторичную микроструктуру и свойства. Распределение элементов по ширине ЗС имеет сложный харак-

тер, который определяется процессами перемешивания наплавленного и основного металла, диффузионного перераспределения элементов между твердой и жидкой фазами и в твердой фазе на этапе охлаждения.

**Основной металл** располагается за пределами ЗТВ и не претерпевает изменений при сварке. Может влиять на превращения в ЗТВ в зависимости от его макро- и микроструктуры, способов первичной обработки металла (прокат, литье, ковка, деформирование в холодном состоянии) и последующей термообработки (отжиг, нормализация, закалка с отпуском, закалка со старением и т. п.).

К основным методам сварки плавлением относятся такие, как газовая, термитная, электродуговая, электрошлаковая, плазменная, лазерная, электронно-лучевая и др.

**Особенности формирования структуры соединения при сварке давлением.** Процесс образования соединения без расплавления соединяемых материалов (в твердой фазе) принято разделять на три основные стадии: образование физического контакта, активация контактных поверхностей и объемное развитие взаимодействия. Физический контакт образуется в результате сближения соединяемых материалов на расстояние, соответствующее расстоянию между частицами при физическом взаимодействии, обусловленном силами Ван-дер-Ваальса, или на расстояние, при котором возникает слабое химическое взаимодействие.

Активация контактных поверхностей сводится к тому, чтобы создать на этих поверхностях такие условия, при которых энергетическое состояние атомов соединяемых материалов в зоне контактирования достигло уровня, необходимого для разрыва старых и образования новых химических связей. Обычно активация контактных поверхностей происходит в результате выхода свежих дислокаций на соединяемые поверхности и образования в этих зонах активных центров взаимодействия. Однако под активными центрами твердофазного взаимодействия пони-

мают более широкий спектр дефектов: дислокации с полем упругих искажений, вакансии, примесные атомы и др., при этом указывается важность и эффективность термического (температурного) канала активации [3, 4]. Третья стадия состоит в развитии взаимодействия как в плоскости контакта (схватывание металлов), так и в объеме зоны контакта. Стадия объемного взаимодействия происходит в результате релаксации упругого поля искажений (в той степени, которая необходима для сохранения образовавшихся связей) и протекания процессов гетеродиффузии. Вопросы активации поверхностей соединяемых металлов и формирования активных центров являются теоретически малоизученными, остается открытым вопрос влияния абсолютных величин и соотношений термического и механического видов энергии на размеры образующихся активных центров. Часто принимают допущение об эквивалентности термического и механического видов энергии, что позволяет рассматривать общую энергию активации как их сумму. С увеличением температуры нагрева роль пластической деформации в образовании сварного соединения снижается [4]. Поэтому принимают допущение, что при достижении температуры плавления механический канал активации не требуется.

Основными разновидностями сварки давлением являются ее такие разновидности как контактная, индукционная с давлением, диффузионная, холодная, взрывом, ультразвуковая, трением и др. К этой группе также относят процессы сварки трением с перемешиванием.

Любой способ сварки должен обеспечить получение неразъемного соединения, обладающего в зависимости от предъявляемых требований высокой прочностью и ударной вязкостью, стойкостью против коррозионного воздействия в различных агрессивных средах, усталостной прочностью при длительных статических и динамических нагрузках, работоспособностью при различных температурно-временных, силовых и других условиях [3].

Крайними случаями соединения в твердой фазе по интенсивности силового воздействия и длительности процесса являются: 1) сварка давлением с подогревом; 2) сварка с высокоинтенсивным силовым воздействием. Все остальные способы расположены между ними. Сварка давлением с подогревом отличается низкой интенсивностью силового воздействия, относительно высокой температурой и большой длительностью процесса. Она является способом, при котором процессы релаксационного характера на стадии объемного взаимодействия могут развиваться до установления равновесия. Сварка с высокоинтенсивным силовым воздействием отличается ничтожно малой длительностью процесса, при которой процессы релаксационного характера на стадии объемного взаимодействия ограничены схватыванием контактных поверхностей без последующего развития в зоне соединения процессов рекристаллизации или гетеродиффузии.

Схема расположения характерных зон соединений при сварке давлением представлена на рисунке 1, б: 2 — зона соединения; 3 — зона термического влияния; 4 — основной материал. Формирование структуры зоны соединения при сварке давлением, особенно с подогревом, связано со следующими особенностями [3]:

1) вследствие геометрической неоднородности соединяемых поверхностей отдельные приконтактные участки (микрообъемы) могут быть значительно деформированы. На них последовательно протекают процессы образования физического контакта, образования межатомных связей и дальнейшего объемного взаимодействия;

2) отдельные микроучастки в зоне соединения могут быть вообще не деформированы, поэтому может наблюдаться широкий спектр деформаций;

3) зона соединения может представлять собой ориентированную в плоскости контакта межзеренную границу, которая содержит поры, несплошности и различные включения (например, оксидов).

**Особенности формирования структуры соединения при сварке трением с перемешиванием.** Принцип этого процесса заключается в том, что вращающийся рабочий инструмент (бурт со штифтом) медленно погружается в стык двух металлических пластин на глубину, примерно равную толщине кромок между верхней и нижней поверхностями соединяемых деталей и в дальнейшем перемещается вдоль соединения. Тепло, выделяющееся при трении вращающегося бурта и поверхности свариваемых пластин, приводит к локальному нагреву и пластификации материалов ниже температуры плавления. Соединение формируется при условии интенсивного пластического деформирования локальных объемов кромок металлических материалов на стыке свариваемых пластин [5–7].

Строение объема соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием (рис. 1, в) представляет собой несимметричную геометрическую фигуру, в которой выделяются зоны: ядра, механотермического влияния (ЗМТВ), термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ) [5–7].

**Зона ядра** выделяется конфигурацией следов ротационной мегапластической деформации в виде замкнутых протяженных каналов неправильной формы, по виду похожих на некие струи шириной менее 15 мкм, заполненные мелкими ( $1 \pm 0,5$  мкм) равноосными зернами. В области ядра, удаленной от пути движущегося инструмента на расстояние не более 1,5 мм, в каналах зафиксированы разрывы длиной от 50 до 200 мкм межзеренного типа. Такие несплошности рассматриваются как результат локального микроскопического износа схватыванием. Процессы перемешивания и структурообразования в зоне ядра следует рассматривать с учетом положений трибологии.

**Зона механотермического влияния (ЗМТВ).** Здесь по мере удаления от ядра соединения ширина и протяженность каналов деформации, а также морфология зерен в них монотонно меняются.

**Зона термического влияния** характеризуется равноосными зернами стабильного (релаксированного) состояния и текстурой, в которой прослеживаются остаточные следы прокатки свариваемых листов. На лицевой поверхности и в объеме соединения границы перехода к ЗТВ выделяются большими градиентами структурных изменений, которые зависят от диаметра вращающегося инструмента, температурного фактора, обусловленного теплофизическими свойствами металла, толщиной соединяемых листов и режимом работы инструмента, а также упруго-пластической аккомодации с металлом из ЗМТВ.

Из-за асимметрии структуры сварного шва в поперечном сечении различают сторону набегания, для которой направление вращения инструмента совпадает с направлением сварки, и противоположную сторону отхода. Каждая зона подвергается разному уровню пластической деформации, что приводит к различиям в микроструктуре. Чтобы получить качественное сварное соединение, необходимо использовать такие параметры сварки, как скорость перемещения рабочего инструмента, скорость вращения и угол наклона инструмента, глубину погружения задней кромки инструмента в соединяемые материалы [8]. Высокие скорости вращения и низкие скорости перемещения могут вызывать перегрев материалов. Если скорость перемещения инструмента слишком высокая, а скорость вращения слишком низкая, процесс сварки будет слишком холодным для получения сварных швов приемлемого качества. Угол наклона оси вращения инструмента от вертикали обычно составляет от  $0^\circ$  до  $4^\circ$ . Наклон позволяет формировать качественный сварной шов за счет создания давления под задней кромкой бурта, где происходит образование шва.

Таким образом, механизм образования физического контакта между соединяемыми поверхностями при сварке трением с перемешиванием существенно отличается от традиционного при сварке давлением. В

сварных соединениях, полученных трением с перемешиванием, отсутствует четко выделенная граница соединения. По аналогии со сваркой плавлением ядро соединения уподобляется сварному шву, однако формируется массопереносом соединяемых материалов вследствие пластической деформации и перемешивания. Эти закономерности позволяют рассматривать процессы получения неразъемных соединений трением с перемешиванием в качестве третьей самостоятельной группы процессов сварки.

Основное внимание авторов многочисленных исследований по проблемам сварки трением с перемешиванием (FSW, СТП) направлено на изучение процессов получения соединений металлов и сплавов на основе алюминия [5–7, 9–16], а также меди, магния, титана и стали [9–16].

Реализация процессов при температурах ниже температуры плавления соединяемых материалов позволяет исключить или минимизировать образование оксидов, хрупких интерметаллических образований, металлургической пористости и трещин, существенных деформаций и остаточных напряжений. Выбор конструкции рабочего инструмента является критически важной задачей при определении технологических параметров СТП, так как его профиль оказывает существенное влияние на перемешивание материала и качество сварного шва [9, 17]. Основными факторами при выборе рабочего инструмента для СТП являются твердость материала заготовок и объем перемешиваемого материала.

В последние годы предпринимаются активные усилия по разработке СТП-процессов для высокотемпературных металлических материалов, прежде всего, титана и титановых сплавов, а также сталей.

Несмотря на то, что СТП-процесс проводится при температурах ниже температур плавления основных материалов, интерметаллиды могут появляться из-за ликвации или диффузии атомов в зоне сварного шва. Отмечается, что в большинстве случаев

присутствие интерметаллидов приводит к увеличению твердости, хрупкости и снижению механической прочности соединений [9–17].

Теория процессов СТП [10] в настоящее время находится в стадии разработки, поскольку физика процессов весьма сложна, многофакторна и требует учета одновременно протекающих процессов тепло- и массопереноса, изменения температуры, пластической деформации, контактных явлений и трения. Отмечается, что исследование процессов СТП затруднено сложностью наблюдения деталей процесса смешения материалов в связи с большими напряжениями и скоростями деформации, поэтому для изучения закономерностей и механизмов СТП-процессов предпринимаются активные усилия по их численному моделированию [18].

Сварка трением с перемешиванием по сравнению с традиционными методами сварки плавлением имеет ряд преимуществ [5, 6, 9, 16, 17, 19]:

- возможность получать прочные сварные швы однородных или разнородных металлов и сплавов, включая алюминий, титан, магний, медь, цинк, никель и их сплавы, сталь, в том числе стыковых соединений переменной толщины;
- отсутствие необходимости в присадочных материалах и защитных газах;
- низкие остаточные напряжения, деформации и усадка даже в протяженных сварных швах;
- мелкий размер зерна в структуре сварного шва, отсутствие или минимальное количество дефектов сварного шва, таких как пористость и трещины;
- безопасность процесса для окружающей среды;
- малый расход энергии;
- отсутствие особых требований к процессу сварки и необходимости в подготовке кромок до сварки и механической обработке после нее.

**Выводы.** Сопоставление и анализ структуры и строения неразъемных соединений,

полученных сваркой трением с перемешиванием, позволяют выделить в отдельную третью группу сварочных процессов. По характеру преобразования веществ в зоне соединения сварочные процессы следует разделять на три основные группы: сварка плавлением; сварка давлением; сварка перемешиванием в твердой фазе. Актуальной проблемой является развитие теоретических и экспериментальных исследований по разработке теории процессов сварки с перемешиванием в твер-

дой фазе, получения конструкций из различных материалов, детального исследования взаимосвязи режимов сварки с перемешиванием, конструкции рабочего инструмента, механизма движения пластифицированных потоков свариваемых материалов, трибологических и коррозионных характеристик сварных соединений, стойкости сварочного инструмента, разработки и исследования способов управления взаимодействием соединяемых материалов и др.

### Список источников

1. Теория сварочных процессов / В. В. Фролов [и др.]. М. : Машиностроение, 1988. 559 с.
2. Петров Г. Л., Тумарев А. С. Теория сварочных процессов. М. : Высш. школа, 1977. 392 с.
3. Каракозов Э. С. Соединение материалов в твердой фазе. М. : Металлургия, 1976. 264 с.
4. Оценка относительной прочности соединения металлов на этапе схватывания при сварке давлением / Г. Р. Латыпова, Р. А. Латыпов, В. В. Булычев, Е. Г. Агеев // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 2 (2). С.102–110.
5. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution / A. Heidarzadeh [et al.] // Progress in Materials Science. 2021. № 117. 68 p. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100752
6. Magalhães V. M., Leitão C., Rodrigues D. M. Friction stir welding industrialisation and research status // Science and technology of welding and joining, 2017. Vol. 23. Iss. 5. P. 400–409. DOI: 10.1080/13621718.2017.1403110
7. 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.
8. Singh Jai, Singh Bikram Jit. Optimization and analysis of hardness of friction stir welding for joining aluminum alloy 6105 using Taguchi technique // Cikitusi journal for multidisciplinary research. 2019. Vol. 6. Iss. 3. P. 187–202.
9. Mishra R. S., Rani P. Friction stir welding/processing studies of aluminum alloy & titanium 64 // International journal of research in engineering and innovation. 2017. Vol. 1. No. 1. P. 209–217.
10. Карманов В. В., Каменева А. Л. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2012. № 32. С. 67–80.
11. Optimization of process parameters: tool pin profile, rotational speed and welding speed for submerged friction stir welding of AA6063 alloy / R. Lokesh, V. S. Senthil Kumar, C. Rathinasuriyan, R. Sankar // International journal of technical research and applications. 2015. Special iss. 12. P. 35–38.
12. El-Morsy Abdel-Wahab, Ghanem Mohamed M., Bahaiham Haitham. Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of AA2024-T4 aluminum alloy // Engineering, technology & applied science research. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 2493–2498.
13. Tool wear characteristics and effect on microstructure in Ti-6Al-4V friction stir welded joints / A. Fall, M. H. Fesharaki, A. R. Khodabandeh, M. Jahazi // Metals. 2016. Vol. 6. No. 275. 12 p.
14. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar titanium alloys: TIMET-54M and ATI-425 / K. Gangwar, M. Ramulu, A. Cantrell, D. G. Sanders // Metals. 2016. Vol. 6. No. 252. 14 p.
15. Gangwar K., Mamidala R., Sanders D. G. Friction stir welding of near  $\alpha$  and  $\alpha + \beta$  titanium alloys: metallurgical and mechanical characterization // Metals. 2017. Vol. 7. No. 565. 23 p.



16. *Recent developments and research progress on friction stir welding of titanium alloys: an overview / Sivaji Karna, Muralimohan Cheepu, D. Venkateswarulu, V. Srikanth // IOP conference series: materials science and engineering. 2018. Iss. 330. 16 p.*

17. *Verma S. M., Misra J. P. A critical review of friction stir welding process // DAAAM International scientific book. 2015. P. 249–266.*

18. *Shercliff Hugh R., Colegrove Paul A. Process modeling // Friction stir welding and processing / editors Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney. ASM International, 2007. Ch. 10. P. 187–217.*

19. *Friction stir welding as an effective alternative technique for light structural alloys mixed joints / F. Micari, G. Buffa, S. Pellegrino, L. Fratini // Procedia Engineering. 2014. Iss. 81. P. 74–83.*

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

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

Статья поступила в редакцию 13.10.2023.

### 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

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

### DEVELOPMENT OF WELDING PROCESSES OF STRUCTURAL MATERIALS

The article is devoted to analyzing the conditions for the formation of typical structures of non-detachable joints obtained by different welding methods with different types of transformation of substances in the connection zone. Three types of welding processes are considered: melting welding, pressure welding and friction stir welding. The necessity to improve the classification of welding processes and the identification of methods of friction stir welding into a separate group is shown. The main advantages and disadvantages of methods of friction stir welding are considered.

**Key words:** zones of welds, formation of bonds between materials to be joined, fusion welding, pressure welding, friction stir welding, stages of formation of welds, welded joints.

### References

1. Frolov V. V. [et al.]. *Theory of welding processes [Teoriya svarochnyh processov]*. M.: Mechanical Engineering, 1988. 559 p. (rus)
2. Petrov G. L., Tumarev A. S. *Theory of welding processes [Teoriya svarochnyh processov]*. M.: Vyssh. shkola, 1977. 392 p. (rus)
3. Karakozov E. S. *Material Coupling in Solid Phase [Soedinenie materialov v tverdoj faze]*. M.: Metalurgija, 1976. 264 p. (rus)

4. Latypova G. R., Latypov R. A., Bulychev V. V., Ageev E. G. Assessment of the relative strength of metal compounds at the pressure welding stage [Ocenka odnositel'noj prochnosti soedineniya metallov na etape skhvatyvaniya pri svarke davleniem]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. No. 2 (2). 2015. Pp. 102–110. (rus)

5. 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. 68 p. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100752

6. Magalhães V. M., Leitão C., Rodrigues D. M. Friction stir welding industrialisation and research status. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2017. Vol. 23. Iss. 5. Pp. 400–409. DOI: 10.1080/13621718.2017.1403110

7. Barakhtin B. K., Vysotskaya M. A. Application of structural system analysis to optimize mixing friction welding modes [Primenenie sistemnogo analiza struktury dlya optimizacii rezhimov svarki treniem s peremeshivaniem]. *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov: mezhvuz. sb. nauch. tr. pod obshchej redakciej V. M. Samsonova, N. Yu. Sdobnyakova*. Tver': Tver' State University, 2015. Iss. 7. Pp. 83–96. (rus)

8. Singh Jai, Singh Bikram Jit. Optimization and analysis of hardness of friction stir welding for joining aluminum alloy 6105 using Taguchi technique. *Cikitusi journal for multidisciplinary research*. 2019. Vol. 6. Iss. 3. Pp. 187–202.

9. Mishra R. S., Rani P. Friction stir welding/processing studies of aluminum alloy & titanium 64. *International Journal of Research in Engineering and Innovation*. 2017. Vol. 1. No. 1. Pp. 209–217.

10. Karmanov V. V., Kameneva A. L. Friction stir welding of aluminium alloys: nature and specific features of the process, features of the weld seam structure [Svarka treniem s peremeshivaniem alyuminiyevykh splavov: sushchnost' i specificheskie osobennosti processa, osobennosti struktury svarnogo shva]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2012. No. 32. Pp. 67–80. (rus)

11. Lokesh R., Senthil Kumar V. S., Rathinasuriyan C., Sankar R. Optimization of process parameters: tool pin profile, rotational speed and welding speed for submerged friction stir welding of AA6063 alloy. *International journal of technical research and applications*. 2015. Special Issue 12. Pp. 35–38.

12. El-Morsy Abdel-Wahab, Ghanem Mohamed M., Bahaiham Haitham. Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of AA2024-T4 aluminum alloy. *Engineering, technology & applied science research*. 2018. Vol. 8. No. 1. Pp. 2493–2498.

13. Fall A., Fesharaki M. H., Khodabandeh A. R., Jahazi M. Tool wear characteristics and effect on microstructure in Ti-6Al-4V friction stir welded joints. *Metals*. 2016. Vol. 6. No. 275. 12 p.

14. Gangwar K., Ramulu M., Cantrell A., Sanders D. G. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar titanium alloys: TIMET-54M and ATI-425. *Metals*. 2016. Vol. 6. No. 252. 14 p.

15. Gangwar K., Mamidala R., Sanders D. G. Friction stir welding of near  $\alpha$  and  $\alpha$ + $\beta$  titanium alloys: metallurgical and mechanical characterization. *Metals*. 2017. Vol. 7. No. 565. 23 p.

16. Sivaji Karna, Muralimohan Cheepu, Venkateswarulu D., Srikanth V. Recent developments and research progress on friction stir welding of titanium alloys: an overview. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2018. Iss. 330. 16 p.

17. Verma S. M., Misra J. P. A critical review of friction stir welding process. *DAAAM international scientific book*. 2015. Pp. 249–266.

18. Shercliff Hugh R., Colegrove Paul A. Process modeling. In: Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney editors. *Friction stir welding and processing*. ASM International, 2007. Ch. 10. Pp. 187–217.

19. Micari F., Buffa G., S. Pellegrino S., Fratini L. Friction stir welding as an effective alternative technique for light structural alloys mixed joints. *Procedia Engineering*. 2014. Iss. 81. P. 74–83.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kharlamov Yuri Aleksandrovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgical Complex Machine  
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 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,  
e-mail: pavelpetrov@list.ru

УДК 62-83; 658.58

**Борисенко В. Ф., \*Сидоров В. А., Землянский А. И.***Донецкий национальный технический университет**\*E-mail: sidorov\_va58@mail.ru***ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*В промышленности подавляющее число электромеханических систем (ЭМС) подвержено различным видам нагружения — это динамические нагрузки в пуско-тормозных, повторно-кратковременные режимы работы механизма, нестационарный характер нагружения, сбои в работе системы управления и контроля, неисправности в механической части (износ подшипников, увеличение зазоров в зубчатых передачах, недостаток смазки и др.), возможность развития резонансных явлений вследствие близости собственной частоты колебаний системы с частотой нагружения, нестабильность напряжения питания, симметричное снижение напряжения по фазам, несимметричное (кратковременное — с последующим восстановлением до номинального). На примере ЭМС шаровой мельницы показаны возможные неисправности в её работе и их влияние на устойчивость работы системы.*

**Ключевые слова:** электромеханическая система, неисправности, колебания напряжения питания, вибрационные показатели.

Основой промышленного производства современной цивилизации являются электромеханические системы, дополненные в последнее время программируемыми системами управления. Высокий уровень безотказности и долговечности данных систем обеспечивает непрерывность технологического процесса энергетических, металлургических, химических, машиностроительных и других отраслей. Нестационарные режимы нагружения, воздействие окружающей среды, ошибки при обслуживании приводят к внезапным отказам электромеханического оборудования после многих лет безаварийной эксплуатации. Успешная ликвидация внезапных отказов требует определения и устранения основных и дополнительных причин для исключения повторения внештатной ситуации. Возможным решением в данном случае становится моделирование технического состояния, предшествующего отказу, на основе логических алгоритмов с учётом физических зависимостей развития повреждений. Математическое моделирование в практике промышленного производства имеет ограниченное применение

из-за отсутствия точного значения фактических параметров систем.

Основой логического моделирования является представление электромеханического привода как сложной системы и определение связей между элементами с учётом их фактического состояния (рис. 1). В процессе эксплуатации работоспособное состояние системы обеспечивают специалисты ремонтных служб (электрической, механической, КИП и А), не учитывая качества поставляемой предприятию электрической энергии.

В связи с этим **целью** настоящей работы явилось моделирование технического состояния, предшествующего отказу, на основе логических алгоритмов с учётом физических зависимостей развития повреждений.

**Объект исследования** — электромеханическая система привода шаровых мельниц горнодобывающей отрасли.

**Предмет исследования** — параметры, характеризующие техническое состояние и закономерности развития неисправностей.

**Задачи исследования:**

– определение возможных неисправностей и диагностических параметров;

– определение подходов к математическому моделированию;

– выявление закономерностей развития повреждений методами виброметрии.

**Методика исследования.** Исследование проводилось на основании рассмотрения математических моделей оценки состояния и развития повреждений. Использовались методы термометрии, ваттметрии (фиксация просадок напряжения) и виброметрии. Применялись портативные приборы и многоканальные анализаторы спектров, а также стационарные системы вибрационного контроля.

**Изложение материала.** Ниже приводим основные неисправности, влияющие на состояние системы.

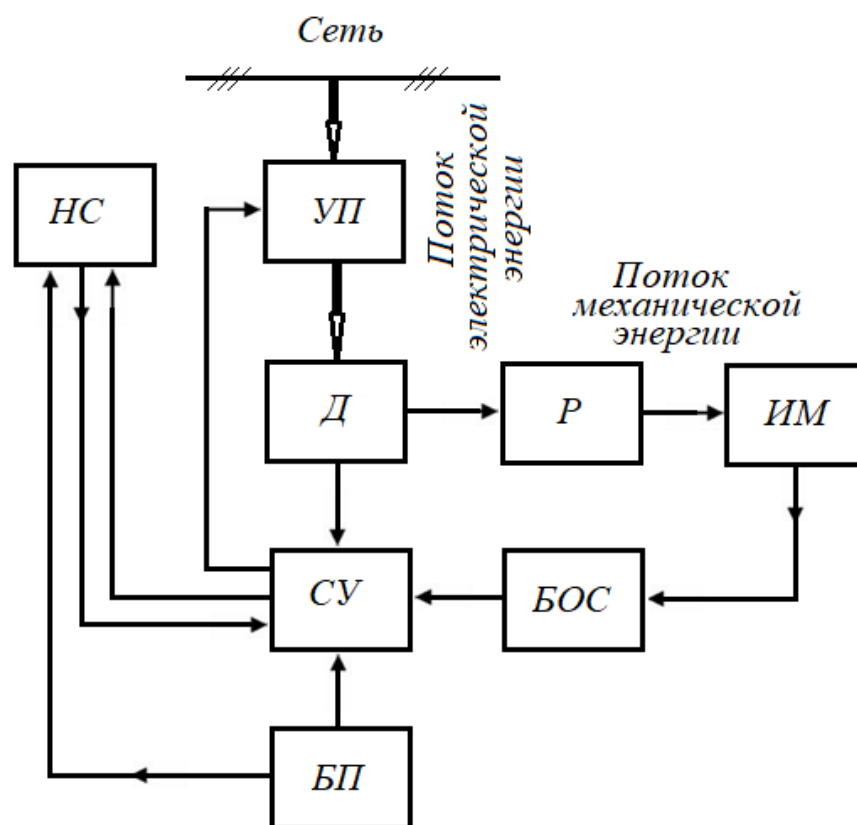
*Система электроснабжения* (ЛЭП) — дисбаланс и нестабильность напряжения

по фазам, гармонические искажения по напряжениям и токам.

*Преобразование электрической энергии* (трансформаторы) — старение и износ изоляции; ослабление прессовки магнитопровода; ослабление затяжки резьбовых соединений; ложное срабатывание газовой и дифференциальной защит.

*Преобразование электрической энергии в механическую* (электродвигатель) — асимметрия в цепи статора из-за естественного старения обмоток; межвитковые замыкания; повышенный нагрев в электромагнитной цепи; повреждённые стержни; эксцентриситет/изгиб ротора.

*Система управления* — нарушения в работе защит, блокировок; отклонения приводов с регулируемой скоростью, плавных пусков.



УП — управляемый преобразователь; Д — двигатель (электромеханический преобразователь); Р — редуктор; ИМ — исполнительный механизм; БОС — блок обратных связей; СУ — система управления; БП — блок питания; НС — наблюдатель состояния

Рисунок 1 — Элементы системы автоматизированного электропривода

*Механическая часть* — повреждения подшипников, ослабление резьбовых соединений, несоосность валов двигателя и редуктора/исполнительного механизма; податливое основание.

*Исполнительная часть* — нестабильность нагрузки; превышение допустимых значений.

Для примера рассмотрим электромеханическую систему шаровой мельницы, имеющей широкое применение в добывающей и энергетической отраслях. Она имеет высокую эксплуатационную надёжность в случае проведения качественного технического обслуживания (рис. 2). Среди основных дефектов данного агрегата отмечаются [1, 2] износ шаров и брони барабана, перегрев подшипников, вибрация, износ зубьев, налипание пыли на обмотку статора. При этом восстановление работоспособного состояния двигателя имеет наибольшее оценочное время устранения (50...950 часов) и сложность определения состояния.

После долгой эксплуатации пыль прилипает к статору, образуя слой определённой толщины, при котором происходит короткое замыкание. Повторение этого явления приводит к повреждению изоляции, что вызовет явление искрения и пробоя, в результате чего шаровая мельница остановится. Без резервного двигателя работать невозможно.

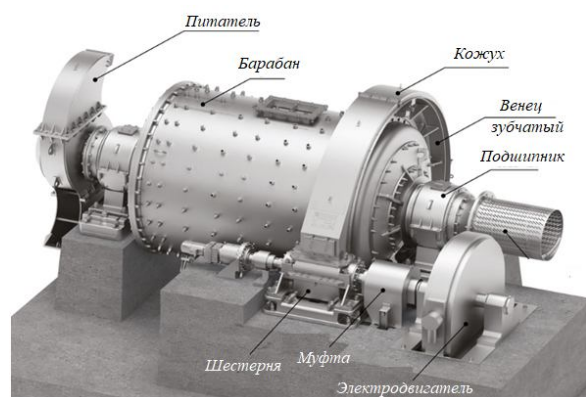


Рисунок 2 — Шаровая мельница: общий вид

Техническое состояние электромеханической системы отслеживается в процессе эксплуатации. Для электродвигателя наиболее слабым элементом является его изоляция: она весьма чувствительна к перегреву, динамическим и вибрационным воздействиям. Для оценки теплового состояния двигателя прибегают к использованию многомассовых расчётных схем, которые могут быть описаны системой уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} = \left( -\sum_{i=2}^m \Lambda_{i1} \right) \theta_1 + \sum_{i=2}^m \Lambda_{i1} \theta_i + P_1, \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} = \left( -\sum_{i=1}^{k(i \neq 2)} \Lambda_{i2} \right) \theta_2 + \sum_{i=1}^{k(i \neq 2)} \Lambda_{i2} \theta_i + P_2, \\ \dots \\ C_n \frac{d\theta_n}{dt} = \left( -\sum_{i=2}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \right) \theta_n + \sum_{i=2}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \theta_i + P_n, \end{cases}$$

где  $C_n$  — теплоёмкость  $n$ -го тела;  $\theta_n$  — температура  $n$ -го тела;  $\theta_i$  — температура одного из соседних тел  $i$ ;  $q$  — количество тел, связанных в тепловом отношении с рассматриваемым телом  $n$ ;  $\Lambda_{in}$  — теплоотдача от одного из соседних тел  $i$  к данному телу  $n$ ;  $P_n$  — потери мощности в данном теле  $n$ ;  $t$  — текущее время;  $m$  — количество тел, связанных в тепловом отношении с первым телом;  $k$  — количество тел, связанных в тепловом отношении со вторым телом.

Решение данной системы приводит к определению средней температуры  $n$ -го тела в момент времени  $t$ . Составление модели сопряжено с трудностями определения фактических коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи. Использование термограмм может стать одним из эффективных методов уточнения расчётных коэффициентов.

В некоторых случаях дополнительную информацию несет регистрация скорости нагрева. Время свободного выбега ротора электродвигателя позволяет оценить значение коэффициента трения с точностью инженерного расчёта, без учёта возможно-

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

го электромагнитного воздействия, используя следующие соотношения.

$$J \cdot \varepsilon = M_{TP}, \omega = \varepsilon \cdot t,$$

принимая

$$J \approx 0,5 \cdot m \cdot R^2, M_{TP} = r \cdot m \cdot g \cdot f_{TP},$$

получаем

$$f_{TP} = (0,5 \cdot m \cdot R^2 \cdot \omega) / (r \cdot m \cdot g \cdot t)$$

или  $f_{TP} = (0,5 \cdot R^2 \cdot \omega) / (r \cdot g \cdot t),$

где  $J$  — момент инерции ротора,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $\varepsilon$  — угловое ускорение,  $\text{с}^{-2}$ ;  $\omega$  — угловая скорость,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t$  — время остановки,  $\text{с}$ ;  $M_{TP}$  — момент трения,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $m$  — масса ротора,  $\text{кг}$ ;  $r$  — радиус трения в подшипнике,  $\text{м}$ ;  $R$  — радиус ротора,  $\text{м}$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

*Пример 1.* Свободный выбег двигателя мощностью 1,2 МВт с частотой вращения 960 об/мин при приёме после ремонта составил  $t_1 = 60$  с. Учитывая, что  $r = 96$  мм, а  $R = 290$  мм, рассчитан коэффициент трения:

$$f_{TP1} = (0,5 \cdot 0,29^2 \cdot 100,5) / (0,096 \cdot 9,81 \cdot 60) = 0,075.$$

После проведения дополнительных ремонтных работ по выверке положения подшипников и смазывания выбег составил  $t_2 = 420$  с, а коэффициент трения:

$$f_{TP2} = (0,5 \cdot 0,29^2 \cdot 100,5) / (0,096 \cdot 9,81 \cdot 420) = 0,011.$$

Для оценки коэффициента трения используются следующие соотношения. При жидкостном трении коэффициент трения составляет 0,001...0,003. Возникновение граничного контакта приводит к увеличению коэффициента трения до значений 0,01...0,03. Сухое трение — 0,15. В результате проведенных дополнительных ремонтных работ состояние подшипникового узла изменилось от плохого до удовлетворительного, необходимого для длительной эксплуатации (рис. 3).

При запуске двигателя происходит интенсивный нагрев его элементов под действием пусковых токов  $I_{II} \approx 5,5 I_H$ , далее

процесс нарастания температур замедляется (рис. 4), т. к. имеет место работа двигателя с постоянной нагрузкой и расчётными условиями охлаждения.

При работе двигателя в повторно-кратковременном режиме, с частыми пусками интенсивность нагрева элементов машины возрастает в первые несколько десятков циклов, далее имеет место переход в квазиустановившийся режим работы (по условиям нагрева). Одновременно на обмотки статора действуют электродинамические силы, имеющие минимальное значение при отсутствии зазоров и проектных значениях жёсткости изоляции и увеличивающиеся при изменении данных параметров. Следовательно, при построении моделей, учитывающих накопление повреждений изоляции статорной обмотки, необходимо учитывать температуру, количество запусков и циклов, исходя из отработанных мотор-часов.

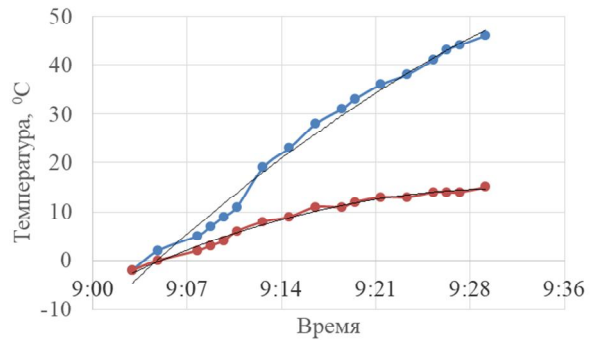


Рисунок 3 — Повышенная скорость нагрева подшипника при нарушении режима смазывания по сравнению с исправным подшипником

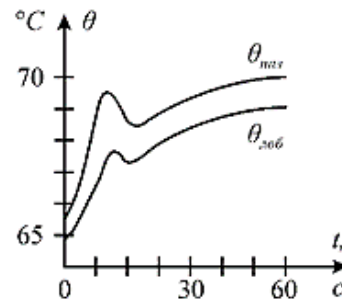


Рисунок 4 — Нагрев обмоток статора в лобовой  $\theta_{лоб}$  и пазовой  $\theta_{наз}$  частях



Время пуска достигает десятков секунд при больших пусковых токах (рис. 5).

Для снижения пусковых токов применяются реакторы ( $X_L$ ), которые шунтируются по окончании пуска, или реализуется ступенчатый пуск через автотрансформатор. В случае применения систем ПЧ — АД, ПЧ — СД не возникает вопросов с ограничением пусковых токов и регулированием производительности агрегатов.

Потребляемая шаровой мельницей электрическая мощность зависит от конструктивных параметров, количества шаров, расхода и прочности загружаемого материала, режима работы (каскадный или водопадный), технического состояния элементов. Входными величинами со стороны электрической системы являются параметры питающего напряжения.

Реализация требований ряда стандартов [3–5 и др.] требует выполнения ряда приборных измерений: активного сопротивления, температуры обмотки, сопротивления изоляции, коэффициента поляризации, относительной влажности окружающего воздуха, тангенса угла диэлектрических потерь, частичного разряда, магнитной индукции, магнитной проницаемости, воздушного зазора. Одновременно появляется возможность контролировать целый ряд параметров в непрерывном режиме при удалённом доступе. Полученные данные требуют тщательного анализа, а отмеченные превышения допустимых значений — учёта в моделях накопления или развития повреждений (рис. 6).

Фиксируемые нестабильные значения напряжения по фазам могут компенсироваться демпфирующими свойствами и инертностью электромагнитной системы или служить причиной снижения частоты вращения и возникновения резонансных явлений, вплоть до остановки агрегата (рис. 7). Определение допустимых значений и методов стабилизации напряжения является одной из актуальных задач

обеспечения стабильности работы электромагнитного привода. Существующие суточные колебания напряжений необходимо учесть при запусках. Изменения токов, напряжений следует фиксировать при уменьшении длительности выборки для первичного определения отклонений и оценки дополнительных колебаний, желательно выделять 3...5 оборотов. Определённую информативность содержат циклы 10...15 с, однако при частоте 970 об/мин — это 160...240 оборотов.

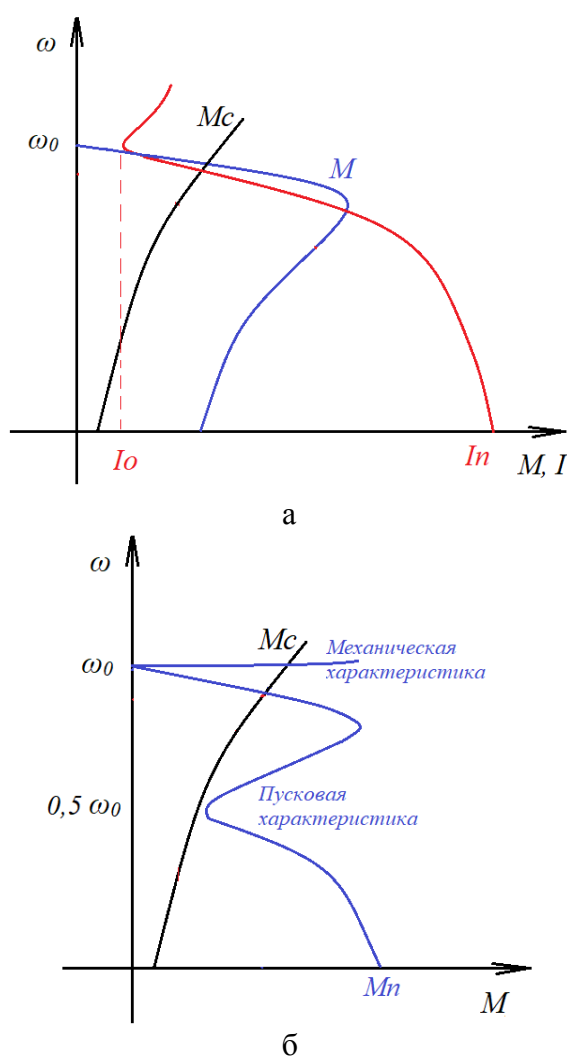


Рисунок 5 — Пусковые характеристики:  
 а) для АД —  $I_n = (5 \dots 7)I_0$ ;  
 б) для СД —  $I_n = (4 \dots 8)I_0$



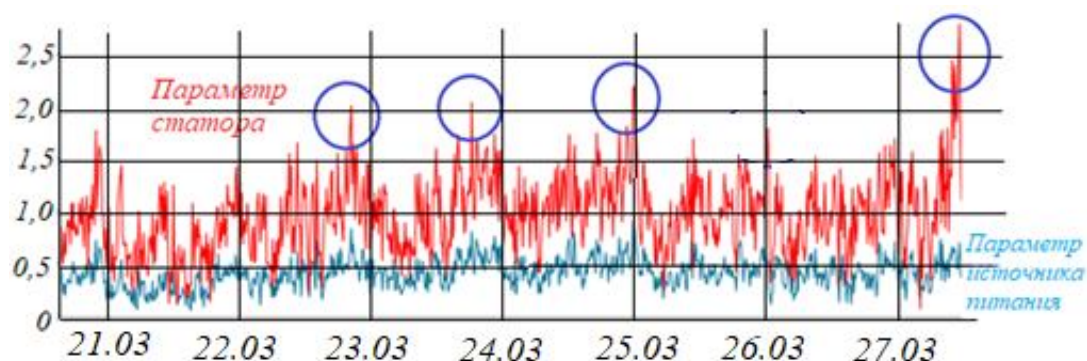


Рисунок 6 — Ток статора (красный цвет) и напряжение питания (синий) в процессе эксплуатации

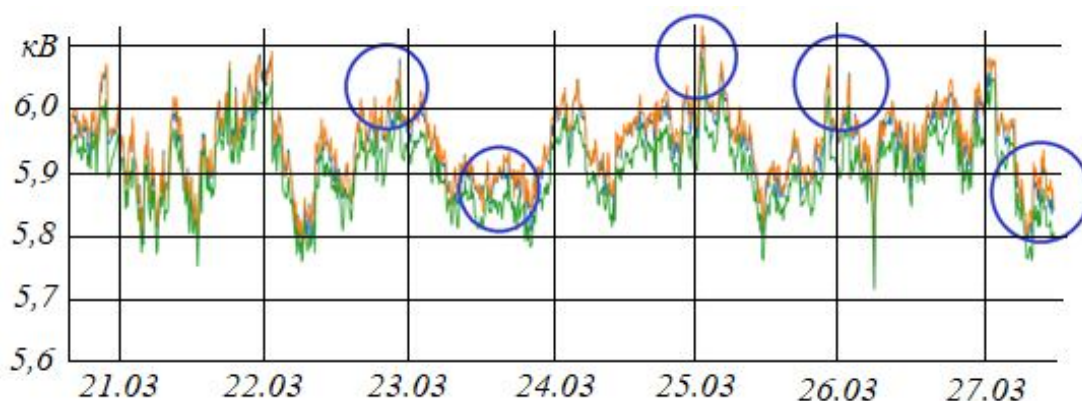


Рисунок 7 — Колебания напряжения питания (по фазам) в процессе эксплуатации

Спектральный анализ, наиболее информативный в этой ситуации, позволяет выполнить идентификацию причин отклонений. Если отклонения оцениваются как критические, то следует принять экстренные меры по предотвращению внезапного отказа. Стационарная система контроля должна дополняться непрерывной работой экспертной системы.

Соосность осей ротора и статора определяет равномерность и интенсивность силовых нагрузок электромагнитного поля, обеспечивая комплексную оценку текущего состояния двигателя. Изменение зазора приводит к нарушению стабильной работы контура намагничивания и к появлению периодических составляющих, влияющих на стабильность магнитного потока и электромагнитного момента двигателя. Появляются дополнительные гармониче-

ские колебания, вызывающие повышенную вибрацию корпуса и связанных с ним деталей. Прямые диагностические измерения воздушного зазора, фиксация фактических электромагнитных полей статора и оценка их равномерности практически невозможны в производственных условиях.

В настоящее время специальные электроприводы оснащаются датчиками ЭДС Холла для измерения магнитного потока и определения характера изменения тока намагничивания. С другой стороны, с помощью средств вычислительной техники возможно решение системы дифференциальных уравнений и определение магнитного потока двигателя. Необходимо заметить, что уравнения составляются при известных идеализированных условиях работы, постоянства потока, параметров двигателя, воздушного зазора и др. Для

упрощения решения системы реальный трёхфазный двигатель приводится к эквивалентному двухфазному, для чего используется система координатных преобразований [6–8].

Однако в реальных условиях при нарушении работы подшипниковых узлов или геометрии двигателя происходит изменение положения ротора относительно обмоток статора, возможны смещения по оси, в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Эти нарушения приводят к неравномерному распределению потока в зазоре, что вызывает появление в составляющих момента двигателя дополнительных пульсаций, приводящих к колебаниям механически связанных с ротором звеньев, в том числе и корпуса двигателя.

Как отмечалось выше, фиксация потока в зазоре двигателя затруднена, измерение фактического воздушного зазора не всегда допускает конструкция двигателя, а установка датчиков Холла в расточке статора может выполняться более с исследовательскими, нежели с практическими целями управления. Установка датчиков в нескольких точках приводит к тому, что их показания усредняются или за основу берутся показания одного датчика, а остальные служат резервом.

Косвенным показателем стабильности воздушного зазора и магнитного потока (тока намагничивания) могут быть значения параметров вибрации и показания температуры, что вполне достаточно для оценки состояния в производственных условиях.

Воздушный зазор между ротором и статором двигателя шаровой мельницы проверяется после каждой разборки. Зазор измеряется в трёх точках, разнесённых на  $120^\circ$  под каждым полюсом с двух сторон. Отклонение зазора от его номинального значения должно быть не более 10 %. Зазор измеряется набором щупов шириной 9 мм, длиной 600 мм. Толщина щупа для замера воздушного зазора принимается из расчёта: непроходной — величина воздушного зазора +10 %, проходной — величина воз-

душного зазора — 10 %. При измерении щуп направляется параллельно оси двигателя по оси полюса, при этом он не должен попадать на пазовый клин. К измеренной величине зазора необходимо прибавить 0,03...0,05 мм, т. к. действительная величина зазора несколько больше измеренной.

Для исследования поведения ЭМС в динамике наиболее часто используется двухмассовая расчётная схема, которая учитывает упруго-вязкие связи в механической системе (рис. 8). В случае учёта сухого трения и зазора поведение системы описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} J_1 \cdot p\omega_1 &= M_1 - M_{12} - M_{TP1}(\omega_1), \\ J_2 \cdot p\omega_2 &= M_{12} - M_2 - M_{TP2}(\omega_2), \\ M_y &= C_{12} \cdot \Delta\varphi_{12}, \\ M_e &= \beta_{12} \cdot \Delta\omega_{12}, \\ M_{12} &= M_y + M_e, \\ \Delta\varphi_{12} &= 0, \text{ если } \Delta\omega_{12}/p \leq \delta\varphi_{12}, \\ \Delta\varphi_{12} &= \Delta\omega_{12}/p, \text{ если } \Delta\omega_{12}/p > \delta\varphi_{12}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $p$  — оператор Лапласа;  $J_m$  — момент инерции первой массы;  $J_2$  — момент инерции второй массы;  $\omega_1$  — частота вращения первой массы;  $\omega_2$  — частота вращения второй массы;  $M_1$  — движущий момент первой массы;  $M_{12}$  — движущий момент второй массы;  $M_2$  — момент сопротивления механизма, приложенный ко второй массе;  $M_{TP1}$  — момент сухого трения первой массы, зависящий от частоты вращения первой массы  $\omega_1$ ;  $M_{TP2}$  — момент сухого трения второй массы, зависящий от частоты вращения второй массы  $\omega_2$ ;  $M_y$  — упругая составляющая момента, пропорциональная углу закручивания вала между первой и второй массами;  $M_e$  — вязкая составляющая момента, пропорциональная разности частот вращения первой и второй масс;  $C_{12}$  — коэффициент упругости между первой и второй массами,  $C_{12} = M_{12}/\Delta\varphi_{12}$ ;  $\beta_{12}$  — коэффициент вязкого трения между первой и второй массами  $\beta_{12} = M_{12}/\Delta\omega_{12}$ ;  $\Delta\varphi_{12}$  — текущее значение угла закручивания между первой и второй массами;  $\Delta\omega_{12}$  — текущее значение разности частот вращения масс;  $\delta\varphi_{12}$  — зазор в кинематической передаче.

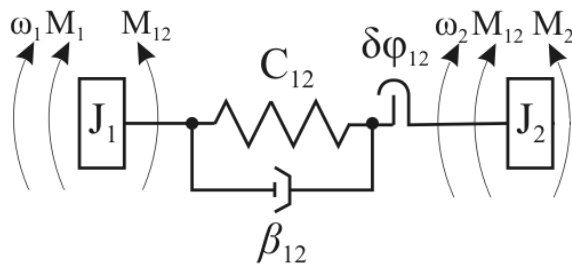


Рисунок 8 — Двухмассовая расчётная схема механической системы

Взаимовлияние механической и электрической частей ЭМС в полной мере в этой модели проследить невозможно. Для этого необходим более полный учёт механической части системы, т. е. за счёт увеличения числа расчётных масс механической части, упругих связей между ними, а также зазоров. Появление неисправностей имитируется изменением значений момента инерции, жёсткости упругой связи и значением зазора, что ограничивает изучение многообразных проявлений неисправностей. В этом случае более информативными становятся вибрационные методы оценки состояния механического оборудования.

При этом используется модель продольных вибрационных колебаний (рис. 9) — основной элемент — двухмассовая расчётная схема со стремящейся к бесконечности второй массой. Данный элемент используется для построения многомассовых расчётных моделей [9] уникальных объектов.

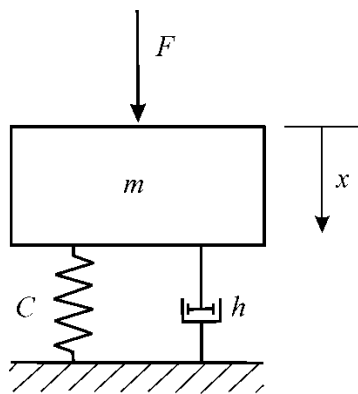


Рисунок 9 — Двухмассовая расчётная схема продольных колебаний

Факторами модели являются: масса —  $m$ , жёсткость —  $c$ , коэффициент демпфирования —  $h$ . Колебания системы возможны при воздействии переменной силы —  $F$ . Характер вынужденных колебаний определяется силами инерции, упругости, демпфирования и возмущающими:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = F. \quad (2)$$

В данной модели учитываются характеристики и реакции системы: масса, жёсткость, коэффициент демпфирования. Значения этих величин при измерениях вибрации неизвестны, но предполагаются неизменными. Повреждения в механической системе приводят к изменению характеристик последней: жёсткости — при износе деталей или ослаблении резьбовых соединений; коэффициента демпфирования — при развитии трещин и др.

Реакции системы (виброускорение, виброскорость, виброперемещение) являются функцией вынуждающей силы и характеристик системы.

Для получения объективной оценки необходимы значения величин:

- виброускорения  $a$  — как показателя сил инерции;
- виброскорости  $V$  — как показателя энергии механических колебаний;
- виброперемещения  $S$  — как показателя линейных отклонений;
- частоты  $f$  — как идентификатора источника механических колебаний.

Идентификация момента появления повреждения при использовании методов виброметрии требует комплексного подхода.

*Пример 2.* По свободному подшипнику двигателя (опора 1) привода шаровой мельницы в 18:00 зафиксирован проворот вкладыша по следующим вибрационным показателям.

Значения результатов измерения общего уровня вибрации в вертикальном направлении представлены в таблице 1.

Полученные данные показывают, что первое отклонение произошло в 16:17 — увеличение в 1,25 раза; второе отклонение в

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

17:35 — увеличение в 1,5 раза; значения виброускорения стабильны. В поперечном направлении значения виброускорения и виброскорости стабильны. В осевом направлении (табл. 2) фиксируется увеличение значения виброускорения в 1,56 раза; увеличение значения виброскорости — в 1,8 раза.

Следовательно, в процессе эксплуатации необходим контроль стабильности значений в течение смены или суток, признак повреждения — увеличение значения более чем в 1,56 раза.

Дополнительно признаки развивающегося повреждения проявляются в виде гармонических составляющих в низкочастотной области в спектрограммах виброскорости (рис. 10).

Одновременно происходит изменение формы временного сигнала (рис. 11) виброускорения, в частности увеличение размаха колебаний в два раза в момент возникновения повреждения. В осевом направлении проявление схватывания при провороте выражено (рис. 12) увеличением большего количества гармонических составляющих. Отмечается также нестабильность временных реализаций виброускорения перед отказом.

Таблица 1

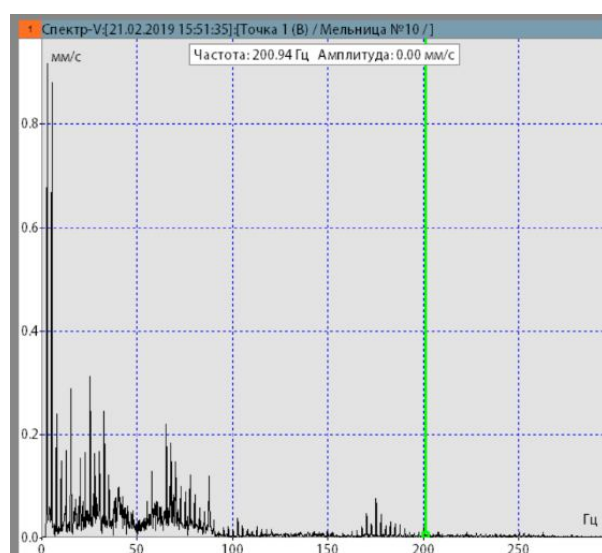
Показатели вибрации опоры 1 двигателя в вертикальном направлении

Время	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, м/с <sup>2</sup>
15:51	1,71	0,9
16:17	2,14	0,94
16:42	1,96	1,10
17:09	1,92	1,05
17:35	2,57	1,15
18:00	3,59	1,57
18:37	1,56	0,73

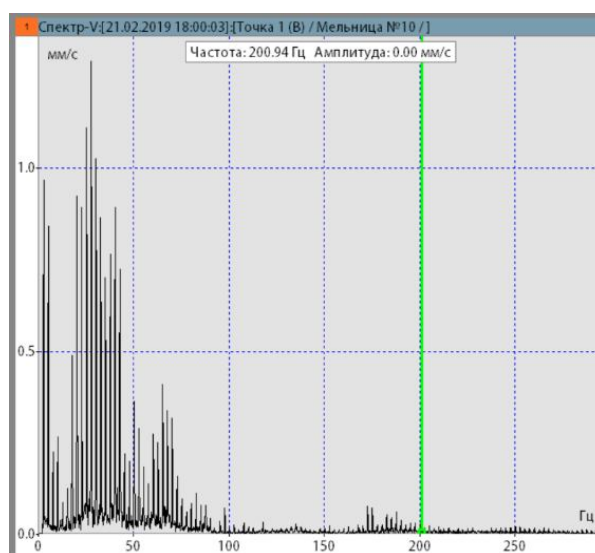
Таблица 2

Показатели вибрации опоры 1 двигателя в осевом направлении

Время	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, м/с <sup>2</sup>
15:51	1,23	0,79
16:17	1,35	0,69
16:42	1,55	0,96
17:09	1,62	0,93
17:35	1,59	1,04
18:00	2,23	1,24
18:37	1,11	0,77



15:51 — исходный сигнал



18:00 — схватывание, проворот

Рисунок 10 — Изменение спектрограмм виброскорости по опоре 1

МАШИНОСТРОЕНИЕ

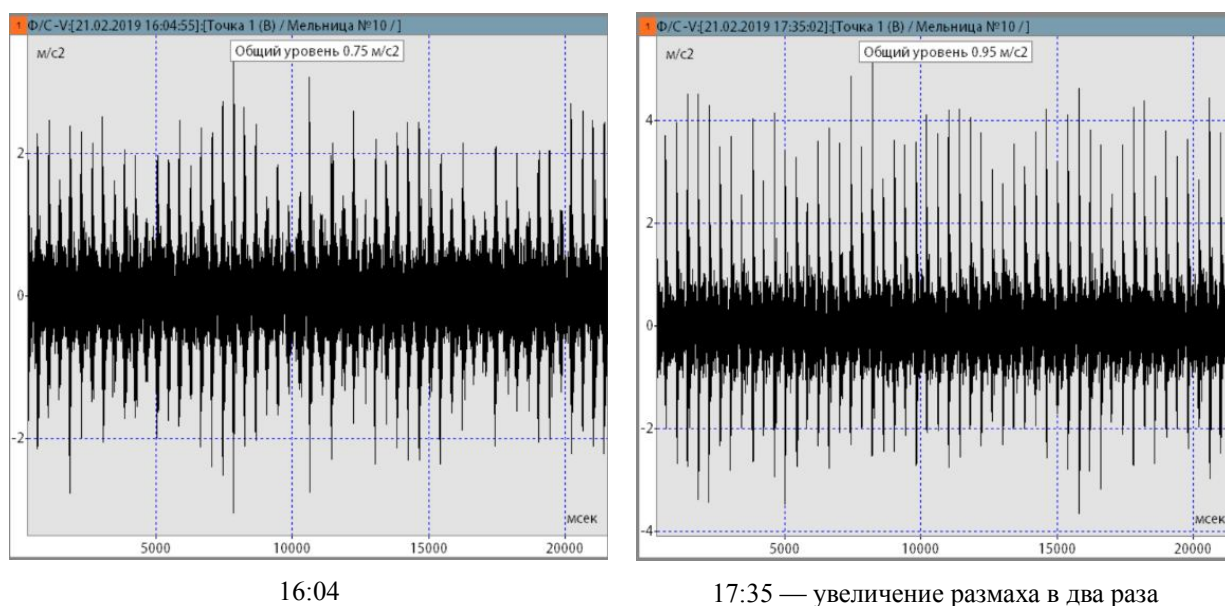


Рисунок 11 — Изменение формы временного сигнала виброускорения по опоре 1

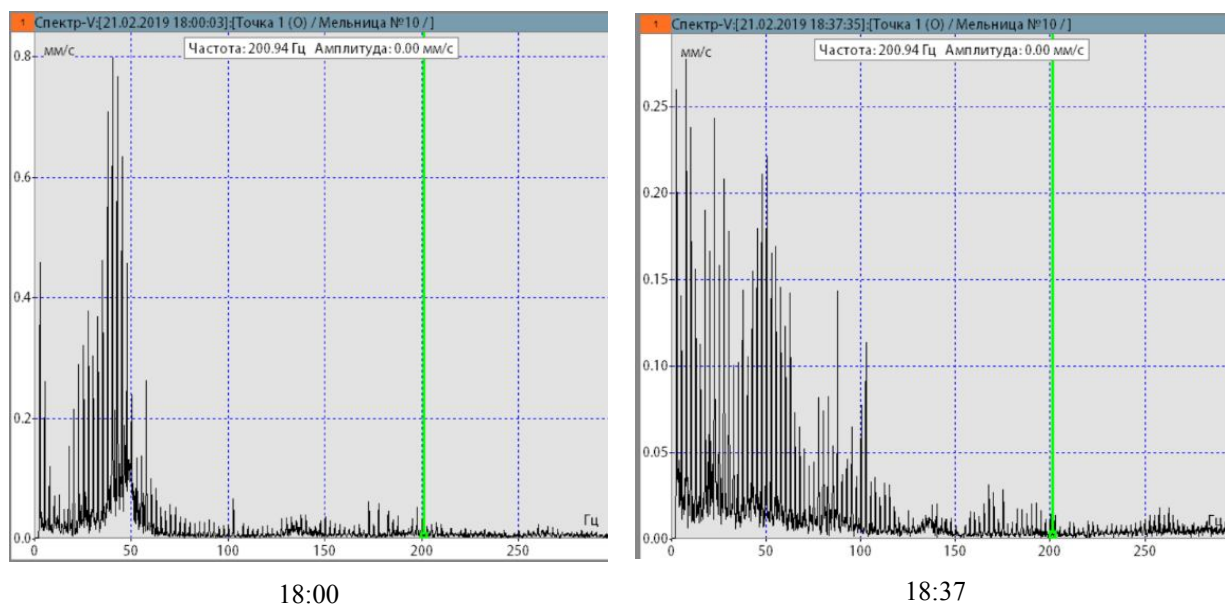


Рисунок 12 — Изменение спектрограмм виброскорости по опоре 1 в осевом направлении при провороте подшипника в корпусе

Модели развития повреждений, такие как модель допустимых значений, износосвая, ступенчатых переходов и логическая, учитывающая взаимное влияние элементов [10], должны быть согласованы с нарушениями качества проводимых операций при техническом обслуживании. Вмешаться в работу двигателя возможно с ограниченным числом операций, но это более ме-

ханическая часть двигателя: затяжка резьбовых соединений; замена подшипников; проверка работы системы смазки; измерение температуры и вибрации; измерение сопротивления изоляции и токов; центровка вала двигателя и механизма. Стабилизация нагрузки, изменение воздушных зазоров между статором и ротором в процессе эксплуатации не могут быть реализованы.

**Выводы и направление дальнейших исследований:**

1. Электромеханические системы, применяемые в промышленности, обладают большой долговечностью и большим запасом прочности. При качественно выполненных монтажных и наладочных работах система работает стабильно.

2. Состояние эксплуатируемых ЭМС определяется влиянием производственной программы, возникающих технологиче-

ских и паразитных сил, при неопределённости качества текущего технического обслуживания и проведенных ремонтов.

3. Различные законы изменения моментов сопротивления, кинематические схемы механизмов, приводимые к определенному числу расчётных схем, подходы к оценке состояния системы, приведенные в данной статье, могут служить основой для составления алгоритма оценки поведения системы в аномальных режимах функционирования.

**Список источников**

1. Бестужева О. В. Прогнозирование остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы с учетом напряженно-деформированного состояния: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2019. 170 с.
2. Гамидов Ф. М. Определение оптимальных параметров конструкции подъемных лифтеров в шаровых мельницах типа SAG MILL // НАУ : сетевой научный журнал. 2020. № 51-1 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-konstruktsii-podemnyh-lifterov-v-sharovykh-melnits-tipa-sag-mill> (дата обращения: 29.07.2023).
3. ИЕС 60034-2-1:2014. Машины электрические вращающиеся. Ч. 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия по испытаниям (за исключением машин для подвижного состава). М. : Стандартинформ, 2018. 63 с.
4. ГОСТ ИЕС/TS 60034-24-2015. Машины электрические вращающиеся. Ч. 24. Онлайн-обнаружение и диагностика потенциальных отказов активных деталей вращающихся электромашин и деталей с подшипниковым током. М. : Стандартинформ, 2016. 8 с.
5. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. М. : Стандартинформ, 2019. 22 с.
6. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М. М. Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, В. А. Ладензон. М. : Энергия, 1967. 200 с.
7. Luczak D. Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection // 2014 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2014. P. 590–595. DOI: 10.1109/MMAR.2014.6957420
8. Об использовании метода контроля состояния машин технологических агрегатов по энергетическим параметрам привода / А. Н. Савельев, М. В. Кипервассер, Д. С. Аниканов, В. Е. Реморов // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 31–33.
9. Логов А. Б., Логов А. Б., Замараев Р. Ю. Математические модели диагностики уникальных объектов. Новосибирск : СО РАН, 1999. 228 с.
10. Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б. Модели отказов / под ред. Б. В. Гнеденко. М. : Советское радио, 1966. 166 с.

© Борисенко В. Ф., Сидоров В. А., Землянский А. И.

**Рекомендована к печати д.т.н., зав. каф. «Управление качеством» ДонНТУ Ченцовым Н. А. д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.**

Статья поступила в редакцию 21.09.2023.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Борисенко Владимир Филиппович**, канд. техн. наук, доцент каф. электропривода и автоматизации промышленных установок  
Донецкий национальный технический университет,  
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия



**Сидоров Владимир Анатольевич**, д-р техн. наук, доцент каф. механического оборудования заводов чёрной металлургии им. профессора В. Я. Седуша  
Донецкий национальный технический университет,  
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия,  
e-mail: sidorov\_va58@mail.ru

**Землянский Андрей Игоревич**, ассистент каф. электропривода и автоматизации промышленных установок  
Донецкий национальный технический университет,  
г. Донецк, Донецкая Народная Республика, Россия,  
e-mail: andrewiz@yandex.ru

**Borisenko V. P., \*Sidorov V. A., Zemlyanskiy A. I.** (*Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic, the Russian Federation, \*e-mail: sidorov\_va58@mail.ru*)  
**ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS IN INDUSTRIAL PRACTICE**

*In industry, the overwhelming number of electromechanical systems (EMS) are subjected to a wide range of loads that is: the dynamic loads in the start-and-brake, intermittent mechanism operation, non-stationary nature of loading, management and control system failures, malfunctions in the mechanical part (bearings runout, increase of gaps in gears, lack of lubrication, etc.), resonance phenomena could arise due to the proximity of the system's vibrational frequency to the loading frequency, power voltage instability, symmetric phase voltage reduction, non-symmetrical (short-term — followed by recovery to nominal). The example of EMS ball mill shows possible failures in its operation and their impact on the system stability.*

**Key words:** *electromechanical system, failures, power supply variations, vibration signatures.*

## References

1. Bestuzheva O. V. Predicting the remaining lifespan of the ball mill's bearing axle taking into account the stress-strain state: thesis of PhD in Engineering [Prognozirovanie ostatochnogo resursa opornyh tsapf sharovoj mel'nicy s uchetom napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya: dis. ... kand. tekhn. nauk]. Belgorod, 2019. 170 p. (rus)
2. Gamidov F. M. Determination of optimum design parameters for lifting elevators in SAG MILL ball mills [Opredelenie optimal'nyh parametrov konstrukcii pod'emnyh lifterov v sharovyh mel'nichah tipa SAG MILL]. NAU: setevoy nauchnyi zhurnal. 2020. No. 51-1 (51). (rus) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-konstruktsii-podemnyh-lifterov-v-sharovyh-melnits-tipa-sag-mill> (data of treatment: 29.07.2023).
3. IEC 60034-2-1:2014. Rotating electrical machines. Part 2-1. Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) [Mashiny elektricheskije vrashchayushchiesya. Chast' 2-1. Standartnyye metody opredeleniya poter' i koeffitsienta poleznogo dejstviya po ispytaniyam (za isklyucheniem mashin dlya podvizhnogo sostava)]. M.: Standartinform, 2018. 63 p. (rus)
4. GOST IEC/TS 60034-24-2015. Rotating electrical machines. Part 24. Online detection and diagnosis of potential failures at the active parts of rotating electrical machines and of bearing currents. [Mashiny elektricheskije vrashchayushchiesya. Chast' 24. Onlajnovoe obnaruzhenie i diagnostika potencial'nyh otkazov aktivnyh detalej vrashchayushchiesya elektromashin i detalej s podshipnikovym tokom]. M.: Standartinform. 2016. 8 p. (rus)
5. GOST ISO 20958-2015. Monitoring and diagnostics of machines. Signature analysis of electrical signals of three-phase asynchronous engine. [Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Signaturnyj analiz elektricheskikh signalov trekhfaznogo asinhronnogo dvigatelya]. M.: Standartinform, 2019. 22 p. (rus)
6. Sokolov M. M., Petrov L. P., Masandilov L. B., Ladenzon V. A. Electromagnetic transient processes in asynchronous electric drive [Elektromagnitnye perekhodnye processy v asinhronnom elektroprivode]. M.: Energiya, 1967. 200 p. (rus)

7. Łuczak D. *Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection*. 2014 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2014. Pp. 590–595. DOI: 10.1109/MMAR.2014.6957420.

8. Savel'ev A. N., Kipervasser M. V., Anikanov D. S., Remorov V. E. *The use of method for monitoring the condition of technological aggregates machines and their energy drive parameters [Ob ispol'zovanii metoda kontrolya sostoyaniya mashin tekhnologicheskikh agregatov po energeticheskim parametram privoda]*. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2013. No. 12 Pp. 31–33. (rus)

9. Logov A. B., Logov A. B., Zamaraev R. Yu. *Mathematical models of diagnostics of unique objects. [Matematicheskie modeli diagnostiki unikal'nykh ob'ektov]*. Novosibirsk: SB RAS, 1999. 228 p. (rus)

10. Gertsbakh I. B., Kordonskiy Kh. B. *Failure model eds. B. V. Gnedenko [Modeli otkazov pod. red. B. V. Gnedenko]*. M.: Sovetskoye radio, 1966. 166 p. (rus)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Borisenko Vladimir Philipovich**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations  
Donetsk National Technical University,  
Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia

**Sidorov Vladimir Anatolievich**, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor 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: sidorov\_va58@mail.ru

**Zemlyanskiy Andrei Igorevich**, Assistant Lecturer of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations  
Donetsk National Technical University,  
Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia  
e-mail: andrewiz@yandex.ru



УДК 621.791.14

**Харламов Ю. А., Петров П. А., \*Орлов А. А.**  
Донбасский государственный технический университет  
\*E-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru

## ПОЛУЧЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

*Статья посвящена развитию сварочных технологий и их применению. Рассмотрены такие высококонцентрированные источники энергии, как плазменные, электронно-лучевые, лазерные и другие. Авторы выделяют ряд недостатков, присущих сварке плавлением. Параметры геометрии инструмента и режимы сварки трением с перемешиванием являются ключевыми факторами, влияющими на формирование качественного сварного соединения. Геометрические особенности фрикционного инструмента и жесткость технологической системы имеют важное значение для обеспечения высокого качества сварки. Помимо этого, параметры, определяющие формирование соединения при СТП, включают тип соединяемых материалов, их теплофизические и физико-механические свойства, тип сварного шва и толщину соединяемых деталей. Работа содержит информацию о системах автоматического управления процессами сварки, что может быть использовано для разработки новых автоматических систем управления сварочными процессами.*

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, СТП, сварные соединения и конструкции, рабочий инструмент, режимы сварки, сварочное оборудование.

**Введение.** Развитие и активное расширение применения сварочных технологий, начиная с 50-х годов прошлого века, связано с применением высококонцентрированных источников энергии (плазменных, электронно-лучевых, лазерных и др.), а также с разработкой теории и новых способов сварки материалов в твердой фазе. Однако сварке плавлением присущ ряд недостатков: остаточные напряжения, приводящие к деформации изделия; прочность сварного шва ниже прочности основного металла; термическое разупрочнение металла, снижающее конструктивную прочность; образование дефектов в виде трещин при сварке ряда высокопрочных термоупрочняемых сплавов; высокая трудоемкость (при многопроходной аргоно-дуговой сварке необходимо зачищать каждый проход шва для снижения вероятности появления дефектов; большое количество слесарных операций при подготовке сварочных кромок перед сваркой и удаление (зачистка) проплава после сварки); для целого ряда высокопрочных сплавов отсутствует сама возможность получить качественное соединение [1]. Поэтому одним из перспективных направлений технологии

изготовления новых видов изделий машиностроения является изыскание и разработка прогрессивных способов сварки, способных устранить или уменьшить недостатки и расширить технологические возможности существующих способов получения неразъемных соединений.

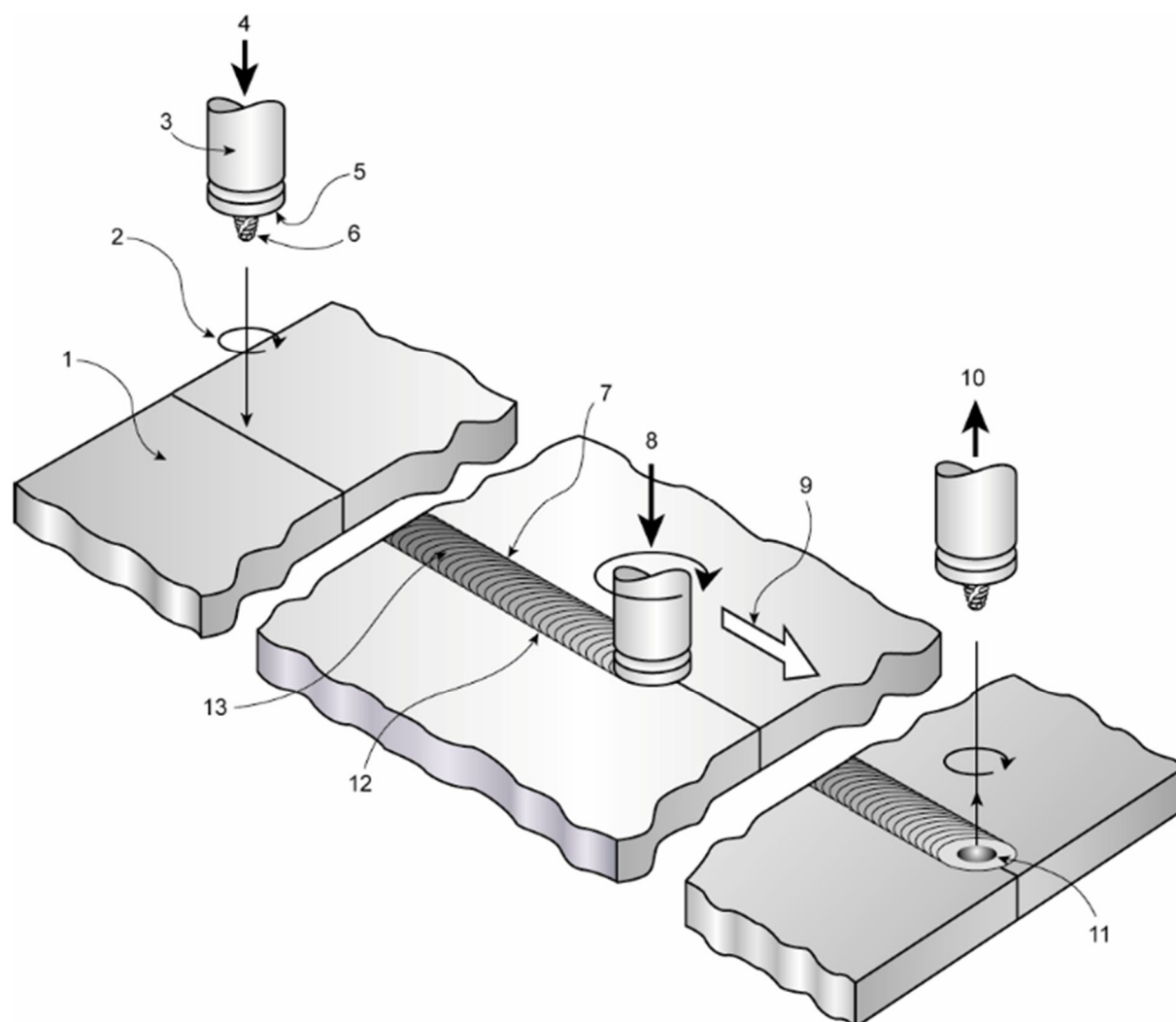
Одним из таких решений явилось изобретение способа сварки трением с перемешиванием (Friction Stir Welding — FSW) (СТП). Этот способ был запатентован в 1991 г. Британским институтом сварки (TWI) и бурно развивается. СТП стала интенсивно изучаться и быстро доведена до широкого применения. Наибольшее распространение сварка трением с перемешиванием получила при производстве корпусных изделий транспортного и авиакосмического назначения из алюминиевых сплавов, что связано в первую очередь с достаточно низкой температурой перехода алюминиевых сплавов в сверхпластичное состояние. Основная проблема использования сварки трением с перемешиванием для более тугоплавких материалов связана с деградацией рабочего инструмента и его износом при повышенных температурах.

Преимущества и недостатки СТП подробно изложены в многочисленной литературе, новые результаты исследований и практических разработок обсуждаются на специальных международных симпозиумах по сварке трением с перемешиванием [2–6].

**Целью данной статьи** является системный анализ процессов сварки трением с

перемешиванием и путей обеспечения качества получаемых сварных швов.

**Сварка трением с перемешиванием** относится к механической группе видов сварки. СТП осуществляется с помощью специального фрикционного инструмента, перемещающегося в направлении сварки. Сущность процесса СТП иллюстрирует принципиальная схема на рисунке 1 [7].

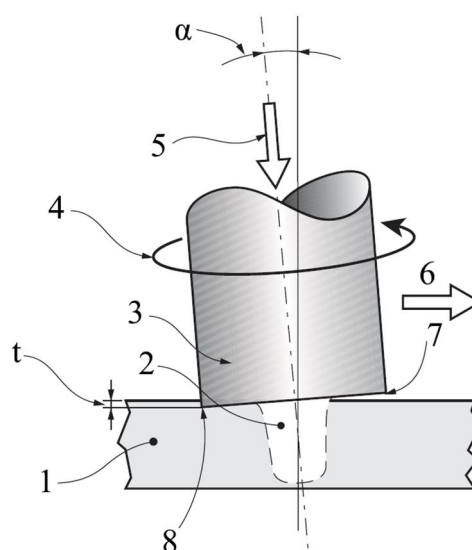


- 1 — свариваемые детали; 2 — направление вращения инструмента (по часовой стрелке);  
 3 — фрикционный инструмент; 4 — направление перемещения сварочного инструмента в начале сварки;  
 5 — заплечик фрикционного инструмента; 6 — наконечник фрикционного инструмента;  
 7 — наступающая сторона сварного соединения; 8 — осевая сила; 9 — направление сварки;  
 10 — направление перемещения фрикционного инструмента в конце сварки; 11 — выходное отверстие —  
 кратер; 12 — отступающая сторона сварного соединения; 13 — сварной шов

Рисунок 1 — Схема сварки трением с перемешиванием [7]

Рабочая часть инструмента 3 имеет специальный профиль. Начальным этапом процесса является введение вращающегося инструмента с заданным усилием внедрения в стык заготовок свариваемого материала. Фрикционный инструмент 3 конструктивно состоит из заплечика 5 и наконечника (рабочего стержня) 6. Процесс СТП заключается во внедрении наконечника вращающегося инструмента в стык свариваемых деталей 1 до контакта и прижима с ними заплечика и его движения вдоль линии стыка и выхода из стыка заготовок в конце сварного шва [7]. Одновременно с этим заготовки прижимаются к подложке вращающимся заплечиком с необходимой осевой силой (поз. 8). Трение, возникающее в контактах «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 температуры плавления металла [2, 3]. За движущимся фрикционным инструментом образуется сварной шов 13. При окончании процесса сварки фрикционный инструмент извлекается из деталей. После извлечения инструмента в конце сварного шва образуется выходное отверстие — кратер 11.

На рисунке 2 приведено эскизное изображение фрикционного инструмента в процессе сварки (вид сбоку). В общем случае фрикционный инструмент наклонен под некоторым углом  $\alpha$  относительно нормали к лицевой поверхности свариваемых деталей. Это приводит к некоторому внедрению задней кромки заплечика в заготовки на величину занижения сварного шва  $t$ . При этом заплечик защищает место сварки от воздействия окружающей среды. В результате нагрева от трения и приложенного давления металл под буртом переходит в размягченное пластифицированное состояние. За счет перемешивания пластифицированного металла с помощью фрикционного инструмента и приложения к нему давления за инструментом образуется сварной шов.



1 — свариваемые детали, 2 — наконечник, 3 — заплечик, 4 — направление вращения, 5 — осевая сила, 6 — направление сварки, 7 — передняя кромка заплечика, 8 — задняя кромка заплечика,  $t$  — занижение сварного шва,  $\alpha$  — угол наклона

Рисунок 2 — Взаимодействие фрикционного инструмента с заготовками в процессе сварки [2, 3]

**Параметры, определяющие формирование соединения при СТП.** Подбор технологических параметров для формирования качественного соединения при СТП зависит от типа соединяемых материалов, их теплофизических и физико-механических свойств, типа сварного шва, толщины и конфигурации соединяемых деталей, геометрии и материала фрикционного инструмента, технологического оснащения для установки и закрепления свариваемых деталей и др. *Основными технологическими параметрами режима сварки*, влияющими на качество сварного соединения при СТП, являются: частота вращения инструмента (шпинделя) ( $n$ , об/мин); направление вращения инструмента (по часовой или против часовой стрелки); направление и скорость перемещения инструмента вдоль сварного шва (скорость сварки ( $v_{св}$ , м/мин); величина внедрения инструмента ( $h$ , мм), учитывающая показатели заглубления наконечника и заглубления заплечика; угол наклона

инструмента ( $\alpha$ ); жесткость технологической системы ( $j$ ), условия и силы закрепления свариваемых заготовок.

Основными параметрами геометрии инструмента являются: форма и диаметр рабочей поверхности заплечика; длина, геометрическая форма и размеры поперечного сечения наконечника и их изменение по длине. Заплечик и наконечник могут быть выполнены гладкими или с различными канавками, выступами, углублениями и другими конструктивными элементами. Чем выше твердость и прочность свариваемых материалов, тем более высокие требования предъявляются к материалам фрикционных инструментов.

В процессе сварки на инструмент действует сила, составляющими которой являются:  $F_x$  — сила сопротивления перемещению в направлении сварки (вдоль шва);  $F_y$  — сила, действующая перпендикулярно направлению сварки в плоскости, параллельной или касательной (при сварке криволинейных поверхностей) поверхностям стыкуемых элементов (плоскость сварки);  $F_z$  — сила, действующая в направлении, перпендикулярном плоскости сварки, с которой связана нормальная сила прижатия инструмента к свариваемым листам ( $P = F_z, H$ ).

На процесс СТП влияют свойства свариваемых материалов: коэффициенты теплопроводности ( $Вт/(см \cdot К)$ ); объемная теплоемкость ( $Дж/см^3 \cdot К$ ); коэффициенты температуропроводности ( $см^2/с$ ); температурные зависимости коэффициента трения между материалами фрикционного инструмента и свариваемых заготовок; температура плавления; температурные зависимости предела текучести и др.

*Вращение инструмента* обеспечивает нагрев материала путем тепловыделения при трении и его перенос в процессе движения инструмента вдоль шва от фронтальной к тыловой части зоны сварки. Увеличение частоты вращения инструмента повышает тепловыделение, интенсифицирует перенос материала и его перемешивание [2, 3].

*Температура соединяемых материалов в зоне сварки* определяется достигаемыми скоростями и моментом вращения инструмента, условиями трения и тепловыделения. Слишком низкая температура материала вызывает высокие силовые воздействия, приводит к повышенному износу или разрушению инструмента. Слишком высокая температура может привести к дефектам, обусловленным плавлением материала, фазовому переходу и рекристаллизации. Максимальная температура при сварке трением с перемешиванием составляет около 70 % значения температуры плавления и для алюминия не превышает  $550\text{ }^\circ\text{C}$  [2].

Основными источниками теплоты являются работа трения на поверхностях контакта инструмента и изделия, а также энергия деформации свариваемого металла. Основным источником стока тепла является его отвод в детали за счет высокой теплопроводности алюминия. Остальными источниками — подкладка и прижимы сборочно-сварочной оснастки, а также конвективный теплообмен с окружающей средой. В инженерных расчетах теплообменом с окружающей средой обычно пренебрегают. Общая тепловая мощность при СТП возникает вследствие преобразования в теплоту работы внешних сил трения в месте контакта инструмента и свариваемой детали, т. е. механической работы. Между механической мощностью и тепловой теоретически нет полной количественной идентичности, так как часть механической энергии переходит в поглощенную энергию деформации кристаллической решетки. Принято считать, что вся механическая энергия переходит в тепловую [8]. При СТП тепловая мощность (тепловложение) определяется зависимостью  $q = M_{тр}\omega$ , где  $M_{тр}$  — крутящий момент (момент трения),  $Нм$ ;  $\omega = \pi n/30$  — угловая скорость вращения инструмента,  $с^{-1}$ ;  $n$  — скорость вращения инструмента,  $об/мин$ .

*Скорость сварки* — один из важнейших параметров. Малые скорости сварки могут привести к перегреву материала, изменению

условий термомеханического воздействия инструмента на заготовки, увеличению зоны термического влияния и в результате — к возникновению дефектов и снижению прочностных характеристик сварного соединения. Скорость сварки и угловую скорость инструмента выбирают так, чтобы температура в зоне сварки была ниже температуры фазового перехода и/или точки твердофазного превращения этих материалов. Для достижения оптимальных условий при увеличении скорости сварки необходимо увеличивать скорость вращения инструмента.

Силы, действующие на инструмент (прижатия и перемещения), зависят от материалов свариваемых заготовок, геометрии сварочного инструмента и его ориентации (наклона) относительно плоскости сварки, скорости сварки и др. При прочих равных условиях значения силы растут с уменьшением температуры и увеличением скорости сварки. Высокие силы могут привести к разрушению инструмента.

*Угол наклона инструмента* относительно нормали к поверхности сварки устанавливается в некоторых случаях для улучшения условий формирования сварного соединения инструмента. Обычно такой наклон производится на угол  $1,5 \dots 4,5^\circ$  с обеспечением более низкого положения края бурта за ее зоной. Наклон инструмента способствует улучшению условий проковки шва буртом. Если угол наклона слишком мал, то это может привести к образованию дефектов в виде непроваров на наружной поверхности шва, а если угол наклона слишком велик — возможно нарушение сплошности шва у корня с образованием тоннельного дефекта.

*Крутящий момент*, обеспечиваемый на шпинделе инструмента, зависит от частоты вращения инструмента, усилия прижима инструмента к заготовке, коэффициента трения предела текучести материала. Величина крутящего момента определяет мощность процесса сварки ( $N = (M_{кр} \cdot n) / 9549$ , кВт).

*Глубина внедрения инструмента* определяется как расстояние от поверхности заготовки до нижнего положения торца

наконечника. Наиболее важными являются глубина заглабления заплечика и положение конца наконечника в корне сварного шва. Глубина погружения заплечика инструмента определяется как расстояние от поверхности заготовки до нижнего положения торца заплечика. Глубина погружения должна обеспечивать условия проковки шва на всю толщину свариваемого материала и исключение образования дефектов.

Слабое прижатие инструмента к поверхности деталей в процессе сварки или недостаточное заглабление заплечика инструмента в свариваемый материал приводит к увеличению объема, который должен заполняться пластифицированным металлом при формировании шва, и, как следствие, к снижению избыточного давления и образованию несплошностей в швах. Кроме того, при небольшом погружении заплечика инструмента в свариваемый металл в зоне сварки выделяется недостаточное количество тепла для обеспечения требуемого уровня пластифицирования, необходимого для качественного формирования шва, и на лицевой поверхности шва образуются дефекты в виде непроплава. Формирование качественных швов обеспечивается при усилиях прижима инструмента  $5 \dots 10$  кН и зависит от марки свариваемого сплава [2, 3]. При этом бурт инструмента должен погружаться в свариваемый металл на глубину  $0,1 \dots 0,2$  мм. Чрезмерное заглабление бурта приводит к перегреву металла и образованию на лицевой поверхности шва дефектов в виде надрывов.

Геометрия рабочего инструмента существенно влияет на течение материала в зоне сварки и, соответственно, на качество сварного соединения [9]. Максимальная температура свариваемого материала находится в зоне, подверженной воздействию участка стыка наконечника и заплечика инструмента [10].

Течение материала и распределение температуры в зоне сварки в существенной мере определяется скоростью вращения инструмента. С увеличением скорости вращения инструмента температура нагрева

материала возрастает и улучшается процесс перемешивания пластифицированного материала, однако повышенная скорость вращения приводит к перегреву материала и деградации его структуры [11]. Другим определяющим параметром является скорость сварки, при увеличении которой происходит уменьшение интегральной температуры области сварки и повышение усилий сварки [12, 13]. Угол ориентации инструмента изменяет усилие сварочного процесса и влияет на формирование микроструктуры сварного соединения [14].

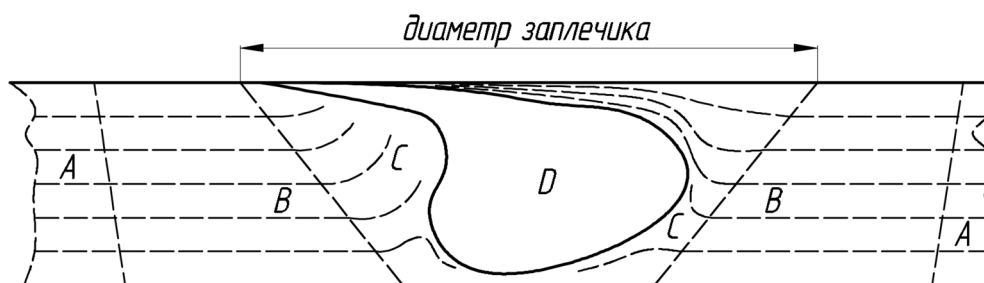
При расположении инструмента по нормали процесс СТП может обеспечиваться особой формой опорного бурта фрикционного инструмента [15]. Важными параметрами также являются усилие прижима заготовок друг к другу и усилие внедрения, действующее на инструмент. При правильном подборе указанных параметров микроструктура сварных швов формируется свободной от дефектов, возникающих при сварке плавлением, а сами швы обладают улучшенными характеристиками [16–18]. В настоящее время разрабатываются модели формирования шва при СТП [19, 20], но механизм пластического течения материала в зоне шва требует дальнейшего изучения.

На сегодняшний день не существует полного комплекта нормативной документации, связанной с технологией СТП, в отличие от сварки плавлением. Серия стандартов ГОСТ ISO 25239 под общим наименованием «Сварка трением с перемешиванием.

Алюминий» состоит из пяти частей: 1. Словарь; 2. Конструкция сварных соединений; 3. Аттестация сварщиков-операторов; 4. Технические требования и аттестация процедуры сварки; 5. Требования к качеству и контролю. Их используют при разработке отраслевых стандартов, например в ГОСТ Р 59849-2021 «Соединения сварные конструкций кузовов железнодорожного подвижного состава из алюминиевых сплавов. Требования к проектированию, изготовлению, ремонту и контролю качества».

**Характерные зоны соединений при сварке трением с перемешиванием.** При СТП формируется шов, в структуре которого можно выделить несколько основных зон: «ядро» сварки, состоящее из термопластически деформированного материала, перенесенного выступом инструмента; зону термопластической деформации и зону термического влияния. Схема формирования сварного шва при перемешивающей сварке трением с указанием типичных зон влияния представлена на рисунке 3 [2, 3].

*Центральная зона перемешивания (ядро сварки)* имеет мелкие равноосные зерна. Такая структура образуется в результате рекристаллизации при действии интенсивных пластических деформаций и высоких температур. Макроструктура зоны перемешивания часто имеет выраженные «кольца» (луковичная структура) «закрученного» материала, испытывает самое сильное искажение и является следствием данного способа.



A — основной металл; B — зона термического влияния; C — зона термодеформационного (термомеханического) воздействия; D — зона перемешивания (ядро шва)

Рисунок 3 — Формирование шва при СТП с указанием зон в его сечении

*Зона термомеханического влияния* лежит по обе стороны зоны перемешивания. Пластическая деформация и температура в этих зонах ниже, чем в зоне перемешивания, следствием чего является образование структуры, имеющей участки мелких и сравнительно крупных зерен, поскольку эта зона рекристаллизована только частично. В зонах термического влияния зерна имеют большие размеры, поскольку их материал подвергается только воздействию повышенных температур при отсутствии пластических деформаций, что сопровождается ростом зерна. Материал в этой зоне имеет наиболее низкие прочностные свойства.

*Зона термического влияния* формируется в условиях меньших температур и температурных градиентов, чем при сварке плавлением, что положительно сказывается на ее структуре. Рост зерен выражен в значительно меньшей мере.

Асимметрия поперечной структуры шва сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием, обусловлена взаимно противоположным движением частей инструмента по правую и левую стороны от его оси вращения (по ходу движения и против хода движения). Различают сторону набегания, где направление вращения инструмента совпадает с направлением линии сварки, и противоположную сторону — отхода.

**Выбор параметров процесса СТП.** Проблемы подбора оптимальных параметров процесса СТП требуют комплексного подхода к изучению кинетики деформирования материала, генерирования и распределения тепла, формирования микроструктуры сварного шва и т. д. Все эти составляющие взаимосвязаны и проблемы оптимизации возникают каждый раз при переходе от одного свариваемого материала к другому, изменении толщины свариваемых материалов, применении различных инструментов. В технологии сварки для каждого случая предполагается существование диапазона значений технологических параметров, который обеспечивает качество сварного

соединения [21]. В случае нарушения технологических параметров методу СТП присуще возникновение тех или иных дефектов структуры сварного соединения (дефектов типа каналов и непроваров, скоплений твердых включений и т. д.).

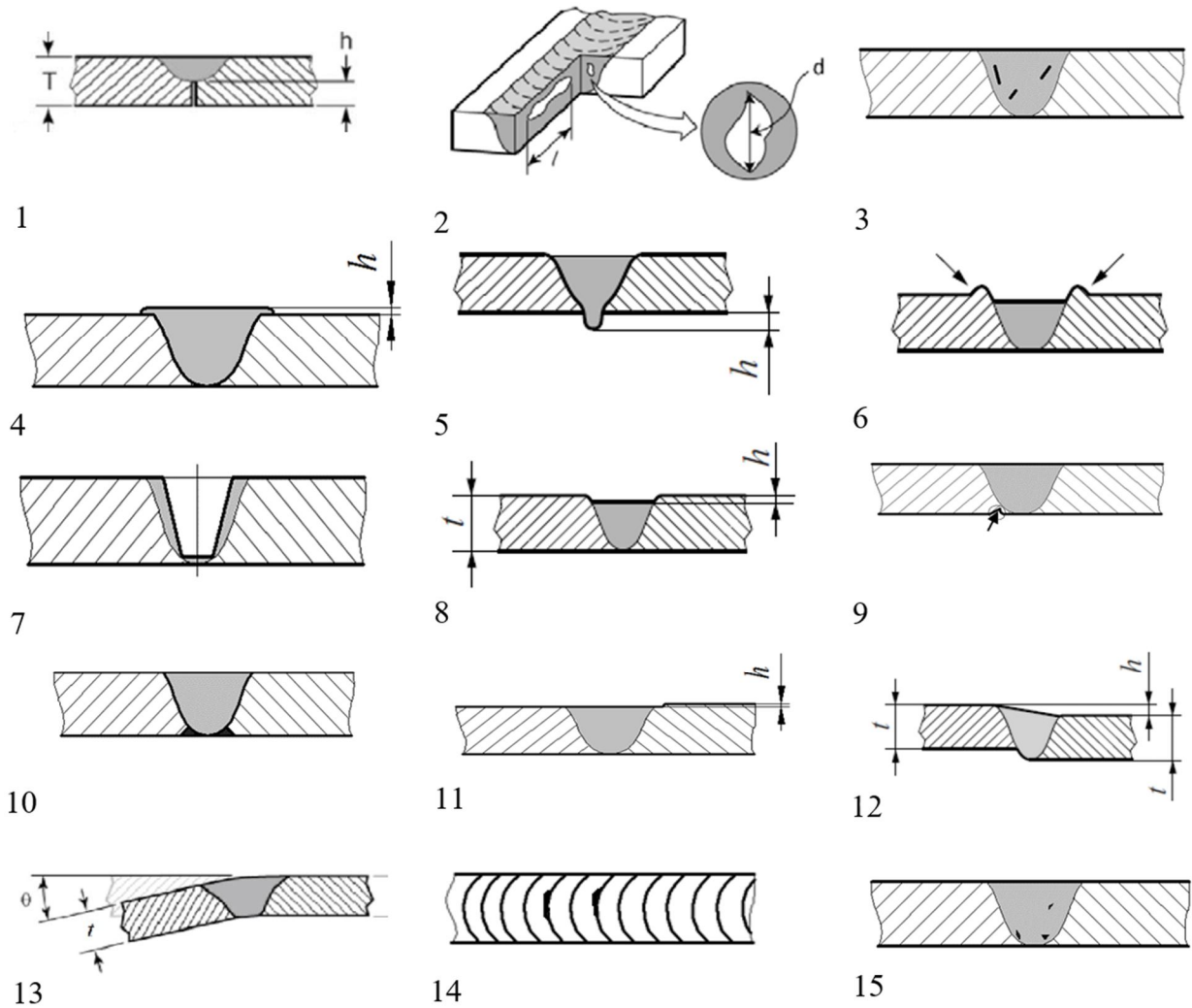
Разрабатываются способы прогнозирования поведения материала в процессе СТП по параметрам, значения которых обусловлены не возможностями оборудования, а реакцией свариваемого материала на интенсивное воздействие сварочного инструмента. Например, методами моделирования оценивают такие характеристики, как крутящий момент на шпинделе инструмента и усилие сварки [22, 23]. Контроль крутящего момента на инструменте открывает широкие возможности для автоматизации процесса СТП и получения качественных сварных соединений со стабильными характеристиками [24]. Предложена эмпирическая модель, позволяющая спрогнозировать температурный режим процесса СТП в зависимости от величины крутящего момента [25]. Однако эти методы еще не доведены до уровня инженерных методик.

Вследствие нарушения требований к сборке и подготовке поверхности свариваемых заготовок, выбору инструмента, а также режимов сварки трением с перемешиванием и технологии возникают дефекты сварных соединений [26]. Полное отсутствие дефектов, а также достижение всех необходимых свойств, надежности и технологичности соединения можно обеспечить тщательным подбором оптимальных режимов для конкретных свариваемых изделий. Неправильный выбор или их отклонение от оптимального значения может приводить к образованию характерных поверхностных или внутренних дефектов в виде грата, несплавлений и несплошностей. Известна классификация дефектов сварных соединений из меди, выполненных СТП, а также методов неразрушающего контроля для их идентификации и локализации [27]. Однако наиболее полно дефекты, возникающие при сварке трением с перемешиванием, изучены для алюминии-

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

вых сплавов, что объясняется их широким применением в процессах СТП. При СТП алюминиевых сплавов можно выделить несколько видов характерных дефектов, возникающих по разным причинам, а именно [28]: несплавление на лицевой поверхности шва, перегрев металла на лицевой поверхности шва, несплавление в корневой части шва и

внутренние дефекты в виде несплошностей. Наиболее легко с помощью визуального контроля выявляются внешние дефекты сварных соединений. К таким дефектам можно отнести протяженные и локальные несплавления, а также перегрев металла на лицевой поверхности шва. Основные виды дефектов представлены на рисунке 4.



1 — «Непровар корня шва» (Incomplete penetration); 2 — «Канал» (Cavity); 3 — «Микротрещины»; 4 — «Наплыв с лицевой стороны шва»; 5 — «Наплыв с корневой стороны шва» (Excess penetration); 6 — «Грат» (Toe flash); 7 — «Кратер»; 8 — «Занижение лицевой стороны шва» (Underfill); 9 — «Подрез»; 10 — «Проникновение металла плакировки»; 11 — «Резкий переход от сварного шва к основному металлу»; 12 — «линейное смещение заготовок» (linear misalignment); 13 — «угловое смещение заготовок» (angular distortion); 14 — «Задиры» (Irregular surface); 15 — «Твердые включения»

Рисунок 4 — Основные виды дефектов соединений при сварке трением с перемешиванием



К основным причинам возникновения несплавления на лицевой поверхности шва можно отнести: малый диаметр заплечика инструмента; большой диаметр наконечника инструмента; значительное углубление на рабочей (торцевой) поверхности заплечика инструмента; недостаточное заглубление заплечика инструмента в свариваемый металл; недостаточное усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; малая частота вращения инструмента; значительная скорость сварки; большой зазор в стыке и смещение оси стыка относительно инструмента; ненадежная фиксация свариваемых кромок [29, 30].

Основные причины образования перегрева лицевой поверхности шва следующие: большой радиус заплечика инструмента; чрезмерное усилие прижатия инструмента; большой угол наклона инструмента относительно вертикальной оси; значительная частота вращения инструмента; малая скорость сварки; недостаточная чистота обработки рабочей поверхности заплечика инструмента; загрязнение поверхностей свариваемых деталей.

Грат при СТП возникает вследствие чрезмерного заглубления заплечика инструмента в свариваемый металл, большого угла наклона инструмента относительно вертикальной оси, чрезмерного завышения (депланации) кромки со стороны отхода инструмента; отклонения инструмента от вертикальной оси влево или вправо относительно стыка, ненадежной фиксации свариваемых кромок.

Наиболее часто встречаемым типом дефекта является непровар корня шва (kissingbond). Непровар — это отсутствие металлических связей по сечению свариваемых кромок деталей, возникающее из-за невозможности пластифицированного металла достичь корня шва [31].

Причинами возникновения несплавления в корневой части шва при СП являются: недостаточные для данной толщины свариваемого металла длина наконечника, погружение заплечика инструмента в свариваемый

металл и усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; большое смещение оси стыка относительно инструмента; износ наконечника инструмента в процессе сварки.

Дефекты в виде рыхлоты возникают в швах как в случае перегрева свариваемого металла, так и при недостаточном тепловыделении для пластификации металла в зоне сварки.

Чрезмерный нагрев металла в зоне сварки, приводящий к оплавлению межзеренных границ со скапливающимися там легкоплавкими эвтектиками, происходит в основном по тем же причинам, что и вследствие перегрева лицевой поверхности шва металла и образования грата. Только степень перегрева металла при этом более высокая.

В случае недостаточного тепловыделения в зоне сварки нарушается непрерывность потока пластифицированного металла, и в шве образуются внутренние, не заполненные металлом полости.

В структуре образцов, сварка которых была выполнена с самыми высокими значениями частоты вращения инструмента наблюдали дефекты сварки, получившие в англоязычной литературе название wormhole или «червоточина» [32, 33].

Этот наиболее часто встречающийся тип дефекта при сварке трением с перемешиванием имеет вид несплошности на наступающей стороне шва и возникает, предположительно, вследствие чрезмерно высокой скорости поступательного движения инструмента относительно заготовки, когда увлекаемый инструментом слой металла не успевает заполнять пространство позади этого инструмента. В пластинах большей толщины этот дефект проявился наиболее масштабно. Можно предположить, что при воздействии динамических нагрузок на сварное соединение снижение прочности будет более заметным, поскольку в этих условиях дефект будет активно играть роль концентратора напряжений.

При изготовлении сварных узлов техническими условиями регламентируются

нормы недопустимых без исправления дефектов, в соответствии с категорией соединения оговаривается их максимальный размер, количество и расположение.

При исправлении дефектов путем подварок наблюдается изменение свойств металла шва и близлежащих участков зоны термического влияния. Степень изменения свойств сварных соединений определяется технологией выполнения подварок.

**Управление процессами сварки трением с перемешиванием** осуществляется соответствующими воздействиями на машину при СТП для обеспечения выполнения заданного технологического процесса сварки с достижением требуемых параметров сварного шва. Оно осуществляется системами автоматического управления (САУ) машин для СТП.

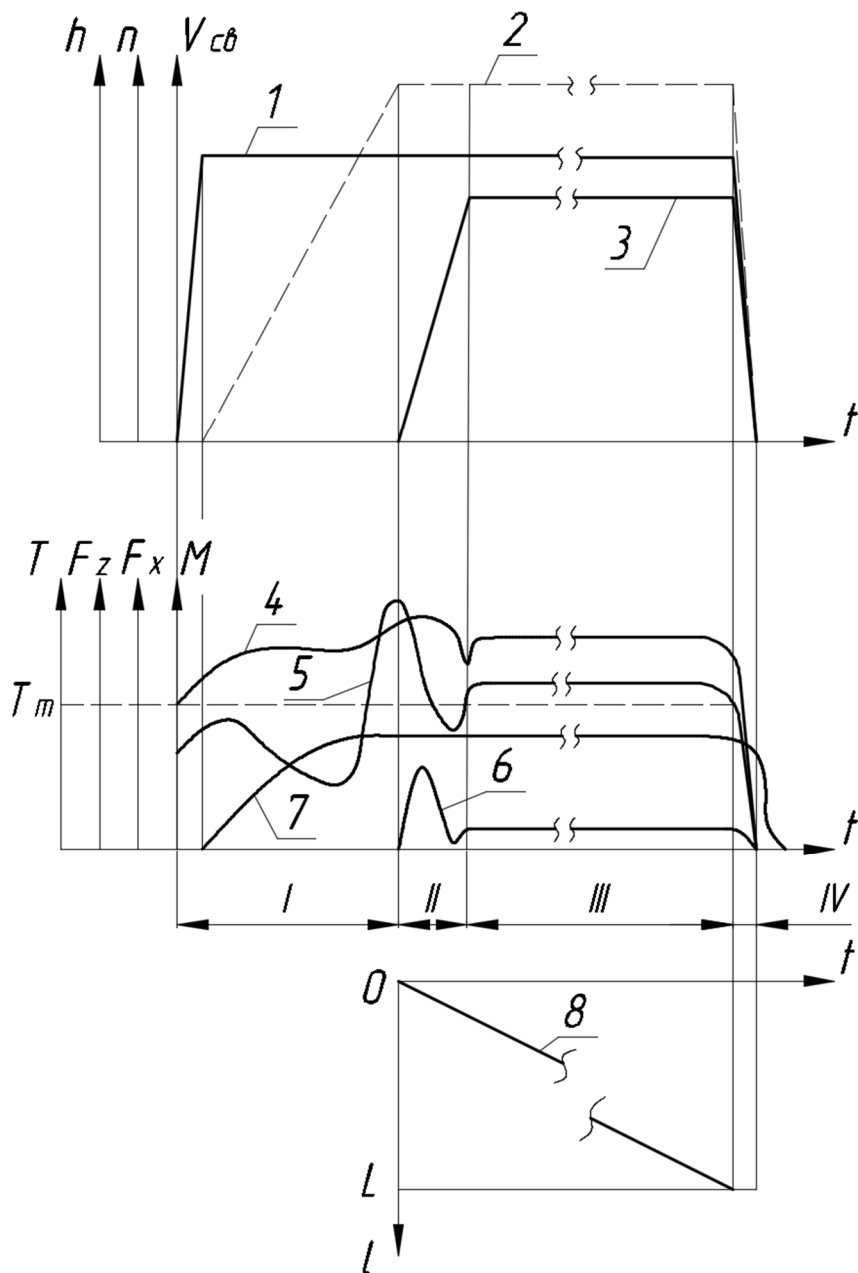
Управление машинами для СТП выполняется на основе заранее разработанных или подобранных программ. САУ обеспечивает: точное и согласованное во времени взаимодействие исполнительных механизмов машины, создающих вращательное движение с заданной угловой скоростью фрикционного инструмента; быстрое перемещение инструмента в точку ввода в заготовки в начале сварного шва; быстрый осевой подвод инструмента к лицевой поверхности заготовок; внедрение с заданной скоростью наконечника в заготовки до точно заданного положения вершины наконечника относительно опорной плиты установочного приспособления; перемещение фрикционного инструмента вдоль сварного шва с заданной скоростью; вывод инструмента из свариваемых заготовок в конце сварного шва. Одной из проблем СТП является формирование качественного соединения в нижней (корневой) части шва, которое зависит, в частности, от величины заглубления инструмента. Эксперименты по сварке тонких листов из сплава АМгб показали, что при отклонении величины заглубления инструмента от номинального значения всего на 0,02 мм в корне шва может возникнуть дефект типа непровара [34].

Обобщенная циклограмма однопроходного процесса СТП представлена на рисунке 5.

Однопроходной процесс получения сварного шва может быть разделен на четыре основных этапа: I — внедрение фрикционного инструмента в свариваемые заготовки в начале процесса формирования сварного шва; II — начало движения фрикционного инструмента вдоль сварного шва до достижения требуемой скорости сварки; III — перемещение фрикционного инструмента вдоль сварного шва (установившийся режим непосредственно сварки); IV — завершение процесса до остановки (вывода) фрикционного инструмента. На первом этапе внедрение инструмента в свариваемые детали начинается с некоторой задержкой от начала его вращения до достижения требуемой угловой скорости. Первый этап заканчивается внедрением инструмента в свариваемые детали на требуемую глубину, разогревом и пластифицированием свариваемых материалов до установленного уровня. После этого начинается второй этап начального движения фрикционного инструмента в направлении сварки с последующим переходом к третьему этапу установившегося режима формирования сварного шва.

По окончании формирования сварного шва на установленной длине начинается заключительный этап вывода инструмента из заготовок. Наибольшие колебания значений осевого усилия на инструменте, момента трения, температуры в зоне сварки и силы сварки наблюдаются на первом и втором этапах. Границы этих этапов смещаются при изменении условий сварки, например, толщины и размеров заготовок.

Системы автоматического управления (САУ) могут работать на основе полной заранее подобранной программы управления процессом СТП для конкретных свариваемых деталей без изменения и корректировки технологических режимов сварки. Подбор и отработка этих режимов выполняются экспериментальными методами или на основе опыта сварки в подобных условиях с экспериментальной проверкой.



I — внедрение фрикционного инструмента в свариваемые заготовки в начале процесса формирования сварного шва; II — начало движения фрикционного инструмента вдоль сварного шва до достижения требуемой скорости сварки; III — перемещение фрикционного инструмента вдоль сварного шва (установившийся режим непосредственно сварки); IV — завершение процесса до остановки (вывода) фрикционного инструмента; 1 — частота вращения фрикционного инструмента; 2 — величина (глубина) внедрения фрикционного инструмента в свариваемые заготовки; 3 — скорость сварки  $v_{св}$  (скорость перемещения фрикционного инструмента вдоль сварного шва); 4 — нормальная (осевая) сила  $F_z$ ; 5 — величина крутящего момента  $M$ ; 6 — сила сопротивления перемещению фрикционного инструмента в направлении сварки  $F_x$  (сила сварки); 7 — температура в зоне сварки; 8 — величина перемещения фрикционного инструмента вдоль сварного шва

Рисунок 5 — Обобщенная циклограмма сварки трением с перемешиванием, отражающая изменение режимных параметров

Другая группа САУ может работать на основе неполной начальной информации, которая с целью оптимального управления дополняется и корректируется в процессе сварки на основе использования текущей технологической информации, получаемой с помощью различных датчиков (адаптивные системы управления).

#### Выводы:

1. Дальнейшее промышленное освоение процессов сварки трением с перемешиванием требует разработки рекомендаций по обеспечению технологичности конструкций, изготавливаемых с применением СТП.

2. Требуют существенного расширения работы по изучению свариваемости и особенностей формирования соединений при СТП более широкой номенклатуры металлов и сплавов, в т. ч. железуглеродистых,

изучение возникающих в них дефектах и методов их предупреждения и разработка норм допустимых дефектов.

3. При разработке фрикционного инструмента для СТП следует учитывать обширный мировой опыт по проектированию, производству и эксплуатации металлорежущего инструмента, а также организации производства фрикционного инструмента на предприятиях инструментальной промышленности.

4. Требуют детального изучения механизмы и причины износа и поломок фрикционного инструмента для СТП и разработка нормативов по их стойкости.

5. Необходимо развивать исследования и разработки по повышению технологической гибкости машин и оснащения для СТП с возможностью снижения серийности производства изделий.

#### Список источников

1. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / А. В. Коновалов [и др.] ; под ред. В. М. Неровного. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2007. 752 с.

2. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing // *Materials Science and Engineering R* 50. 2005. P. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.

3. 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.

4. Люшинский А. В., Баранов А. А. Сварка трением с перемешиванием как альтернативный способ получения неразъемных соединений // *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии : сборник материалов и докладов международной конференции, Москва, 17–20 ноября 2015 года*. М. : Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2015. С. 446–449.

5. Сафиуллин Р. Ш., Никитин В. В. Экспериментальное исследование условий формирования сварных соединений методом СТП // *Инновационное и цифровое машиностроение : материалы Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение», Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства России» [Электронный ресурс]*. Уфа : УГАТУ, 2021. С. 358–362. URL: [https://ugatu.ru/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El\\_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf](https://ugatu.ru/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf).

6. Влияние подачи на один оборот инструмента при сварке трением с перемешиванием на формирование и свойства швов алюминиевого сплава 1565чМ / А. М. Дриц, В. В. Овчинников, В. А. Бакшаев, Д. В. Малов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2017. Т. 15. № 10. С. 442–451.

7. ГОСТ ISO 25239-2-2020. Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Ч. 1. Словарь. М. : Стандартинформ. 2020. 19 с.

8. Котлышев Р. П., Шучев К. Г., Крамской А. В. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // *Вестник ДГТУ*. 2010. Т. 10. № 5 (48). С. 648–654.

9. Dabeer P., Shindle G. Perspective of friction stir welding tools // *Materials today: proceedings*. 2018. Vol. 5. Iss. 5. Pt. 2. P. 13166–13176.

10. Nosal P., Ganczarski A. Modelling of the temperature field that accompanies friction stir welding // *ITM web of conferences*. 2017. Vol. 15. Article number 03004. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171503004>.

11. Characteristic study on Al7020 friction stir joints with various rotational speeds / A. W. A. Lenin, P. Nagaraj, G. Lincy, L. Thangavelu // *International journal of computer aided engineering and technology*. 2018. Vol. 10. № 6. P. 703–717.

12. Lee Ho-Sung, Lee Ye Rim, Min Kyung Ju. Effects of friction stir welding speed on AA2195 alloy // *MATEC web of conferences*. 2016. Vol. 45. Article number 01003. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164501003>.

13. Исследование процесса сварки трением с перемешиванием пластин из алюминиевого сплава АМГ6 / И. К. Черных, Е. В. Кривонос, Е. Н. Мамузко, Е. В. Васильев // *Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли: материалы IX всероссийской научной конференции, посвященной памяти главного конструктора ПО «Полёт» А. С. Клинышкова*. 2017. С. 126–134.

14. Suresh Babu A., Devanathan C. An overview of friction stir welding // *International journal of research in mechanical engineering & technology*. 2013. Vol. 3. Iss. 2. P. 259–265.

15. Mugada K. K., Adepu K. Influence of tool shoulder end features on friction stir weld characteristics of Al–Mg–Si alloy // *International journal of advanced manufacturing technology*. 2018. Vol. 99. Iss. 5–8. P. 1553–1566.

16. Stephen Leon J., Jayakumar V. Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding // *International journal of student's research in technology & management*. 2014. Vol. 2. Iss. 04. P. 140–144.

17. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H. Recent advances in friction-stir welding: process, weldment structure and properties // *Progress in materials science*. 2008. Vol. 53. Iss. 6. P. 980–1023.

18. Suman P. A., Srinivasa Rao P., Sreeramulu D. Survey on friction stir welding of dissimilar magnesium alloys // *International journal of scientific research and review*. 2019. Vol. 8. Iss. 1. P. 26–38.

19. Principles and thermo-mechanical model of friction stir welding / J. T. Khairuddin, J. Abdullah, Z. Hussain, I. P. Almanar // *Welding processes*. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. P. 191–216.

20. Kossakowski P., Wciślik W., Bakalarz M. Macrostructural analysis of friction stir welding (FSW) joints // *Journal of mechanical engineering research*. 2018. Vol. 01. Iss. 01. P. 28–33.

21. Podrżaj P., Jerman B., Klobčar D. Welding defects at friction stir welding // *Metalurgija*. 2015. Vol. 54. Iss. 2. P. 387–389.

22. Research of the friction stir welding process of aluminium alloys // R. Česnavičius [et al.] // *Mechanika*. 2016. Vol. 22. Iss. 4. P. 291–296.

23. Mehta M., Chatterjee K., De A. Monitoring torque and traverse force in friction stir welding from input electrical signatures of driving motors // *Science and technology of welding & joining*. 2013. Vol. 18. Iss. 3. P. 191–197.

24. Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation / W. R. Longhurst, A. M. Strauss, G. E. Cook, P. A. Fleming // *International journal of advanced manufacturing technology*. 2010. Vol. 51. Iss. 9. P. 905–913.

25. Torque-based adaptive temperature control in friction stir welding: a feasibility study / A. Bachmann [et al.] // *Production engineering*. 2018. Vol. 12. P. 391–403.

26. Афанасьев Н. Ю., Кулик В. И. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов при изготовлении РКТ // *РИТМ машиностроения*. 2019. № 7. С. 36–39.

27. 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](https://doi.org/10.52177/2071-5234_2022_03_19)

28. 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.

29. Определение дефектов в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием / А. В. Филиппов, С. Ю. Тарасов, Е. А. Колубаев, В. Е. Рубцов // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 6. С. 296–310.

30. Дриц А. М., Овчинников В. В. Влияние подварок на свойства сварных соединений сплавов 1565ч и 1460, выполненных аргонодуговой сваркой и сваркой трением с перемешиванием // *Технология легких сплавов*. 2018. № 4. С. 65–77.

31. Friction stir welding: process, automation and control / B. T. Gibson [et al.] // *Journal of manufacturing processes*. 2014. Vol. 16. Iss. 1. P. 56–73. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.04.002

32. Microstructural studies of friction stir welds in 2024–T3 aluminum / M. A. Sutton, B. Yang, A. P. Reynolds, R. Taylor // *Materials science and engineering*. 2002. Vol. 323. P. 160–166.

33. Ultrasonic phase array and eddy current methods for diagnostics of flaws in friction stir welds / V. Rubtsov, S. Tarasov, E. Kolubaev, S. Psakhie // *AIP conference proceedings*. 2014. Vol. 1623. P. 539–542.

34. Шипша В. Г. Новый подход в технологии вихревого контроля сварных швов лейнеров, получаемых фрикционной сваркой // *Территория NDT*. 2016. № 4. С. 36–38.

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

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

Статья поступила в редакцию 11.10.2023.

#### **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

**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., Petrov P. A., \*Orlov A. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, the Russian Federation, \*e-mail: orlov.orlov-andrey193@yandex.ru)

#### **OBTAINING WELDS BY FRICTION STIR**

The article is devoted to the development of welding technologies and their application. Such highly concentrated energy sources as plasma, electron-beam, laser and others are studied. The authors highlight a number of shortcomings inherent in melting welding. Tool geometry and friction stir welding modes are the key factors influencing the formation of high-quality welding connection. High quality welding is ensured by the geometric features of the friction tool and the rigidity of the technological system. Aside from that, the parameters that modify the formation of joints at FSW include the type of joinable materials, their thermal and physical-mechanical properties, the weld joint type and thickness of joinable parts. The work contains information about automatic control systems for welding processes, that can be used for the development of a new automatic systems for controlling welding processes.

**Key words:** friction stir welding, FSW, welded joints and structures, working tool, welding modes, welding equipment.

#### **References**

1. Kononov A. V. *Theory of welding processes: textbook for universities eds. V. M. Nerovnogo [Teoriya svarochnyh processov: uchebnik dlya vuzov pod red. V. M. Nerovnogo]*. M.: Bauman University Publishing House, 2007. 752 p. (rus)

2. Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing: Materials Science and Engineering R 50. 2005. Pp. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.

3. Pedro Vilaça, João Gandra and Catarina Vidal. 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.

4. Liushinskiy A. V., Baranov A. A. Friction stir welding as an alternative method for obtaining nondetachable joints [Svarka treniem s peremeshivaniem kak al'ternativnyy sposob polucheniya neraz'mnyh soedinenij]. Nacionalnyy issledovatel'skiy universitet "MEI" 17–20 noyabrya 2015: Sbornik materialov i dokladov. M.: Izdatel'stvo MEI, 2015. Pp. 399–406. (rus)

5. Safullin R. Sh., Nikitin V. V. Experimental study of conditions of welded joints formation by the FSM method [Eksperimental'noe issledovanie usloviy formirovaniya svarnyh soedinenij metodom STP]. Innovacionnoe i cifrovoe mashinostroenie: materialy Vserossiiskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Stankostroenie i cifrovoe mashinostroenie", Vserossiiskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Sostoyanie i perspektivy razvitiya svarchnogo proizvodstva Rossii". UFA: USATU, 2021. Pp. 358–362. URL: [https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El\\_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf](https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/innov-i-tsifr-mashinostr.pdf). (rus)

6. Drits A. M., Ovchinnikov V. V., Bakshaev V. A., Malov D. V. Impact of single-turn tool application during friction stir welding on the formation and properties of welds of aluminum alloy 1565hM [Vliyanie podachi na odin oborot instrumenta pri svarke treniem s peremeshivaniem na formirovanie i svoystva shvov alyuminievogo splava 1565chM]. Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2017. Vol. 15. No. 10. Pp. 442–451. (rus)

7. GOST ISO 25239-2-2020. Friction stir welding. Aluminium. Part 1. Dictionary. [Svarka treniem s peremeshivaniem. Alyuminij. Chast' I. Slovar']. M.: Standartinform, 2020. 19 p. (rus)

8. Kotlyshev R. R., Shuchev K. G., Kramskoj A. V. Temperature calculation for aluminum alloy friction stir welding [Raschet temperatur pri svarke treniem s peremeshivaniem alyuminievyh splavov]. Vestnik of DSTU. 2010. Vol. 10. No. 5 (48). Pp. 648–654. (rus)

9. Dabeer P., Shindle G. Perspective of Friction Stir Welding Tools. Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. Iss. 5. Pt. 2. Pp. 13166–13176.

10. Nosal P., Ganczarski A. Modelling of the temperature field that accompanies friction stir welding. ITM Web of Conferences. 2017. Vol. 15. Article number 03004. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171503004>.

11. Lenin A. W. A., Nagaraj P., Lincy G., Thangavelu L. Characteristic study on Al7020 friction stir joints with various rotational speeds. International journal of computer aided engineering and technology. 2018. Vol. 10. No. 6. Pp. 703–717.

12. Lee Ho-Sung, Lee Ye Rim, Min Kyung Ju. Effects of Friction Stir Welding Speed on AA2195 alloy. MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 45. Article number 01003 Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20164501003>.

13. Chernykh I. K., Krivonos E. V., Matuzko E. N., Vasiliev E. V. Study of the agitation friction welding process for AMG6 aluminum alloy plates. [Issledovanie processa svarki treniem s peremeshivaniem plastin iz alyuminievogo splava AMG6]. Problemy razrabotki, izgotovleniya i ekspluatacii raketno-kosmicheskoy tekhniki i podgotovki inzhenernyh kadrov dlya aviakosmicheskoy otrasli. Materialy IX Vserossiiskoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj pamyati glavnogo konstruktora PO "Polyot" A. S. Klinyshkova. 2017. Pp. 126–134. (rus)

14. Suresh Babu A., Devanathan C. An Overview of friction stir welding. International journal of research in mechanical engineering & technology. 2013. Vol. 3. Iss. 2. Pp. 259–265.

15. Mugada K. K., Adepu K. Influence of tool shoulder end features on friction stir weld characteristics of Al–Mg–Si alloy. International journal of advanced manufacturing technology. 2018. Vol. 99. Iss. 5–8. Pp. 1553–1566.

16. Stephen Leon J., Jayakumar V. Investigation of mechanical properties of aluminum 6061 alloy friction stir welding. International journal of student's research in technology & management. 2014. Vol. 2. Iss. 04. Pp. 140–144.

17. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H. Recent advances in friction-stir welding: Process, weldment structure and properties. Progress in materials science. 2008. Vol. 53. Iss. 6. Pp. 980–1023.

18. Suman P. A., Srinivasa Rao P., Sreeramulu D. Survey on friction stir welding of dissimilar magnesium alloys. *International journal of Scientific research and review*. 2019. Vol. 8. Iss. 1. Pp. 26–38.
19. Khairuddin J. T., Abdullah J., Hussain Z., Almanar I. P. Principles and thermo-mechanical model of friction stir welding. *Welding processes*. Rijeka, Croatia: InTech. 2012. Pp. 191–216.
20. Kossakowski P., Wciślik W., Bakalarz M. Macrostructural analysis of friction stir welding (FSW) joints. *Journal of mechanical engineering research*. 2018. Vol. 01. Iss. 01. Pp. 28–33.
21. Podržaj P., Jerman B., Klobčar D. Welding defects at friction stir welding. *Metalurgija*. 2015. Vol. 54. Iss. 2. Pp. 387–389.
22. Česnavičius R. [et al.] Research of the friction stir welding process of aluminium alloys. *Mechanika*. 2016. Vol. 22. Iss. 4. Pp. 291–296.
23. Mehta M., Chatterjee K., De A. Monitoring torque and traverse force in friction stir welding from input electrical signatures of driving motors. *Science and technology of welding & joining*. 2013. Vol. 18. Iss. 3. Pp. 191–197.
24. Longhurst W. R., Strauss A. M., Cook G. E., Fleming P. A. Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation. *International journal of advanced manufacturing technology*. 2010. Vol. 51. Iss. 9. Pp. 905–913.
25. Bachmann A. Torque-based adaptive temperature control in friction stir welding: a feasibility study. [et al.]. *Production Engineering*. 2018. Vol. 12. Pp. 391–403.
26. Afanasiev N. Yu., Kulik V. I. Aluminium alloy friction stir welding in RCT manufacturing [Svarka treniem s peremeshivaniem alyuminiyevyh splavov pri izgotovlenii RKT]. *Rhythm of machinery*. 2019. No. 7. Pp. 36–39. (rus)
27. Sotnikov A. L., Mukhovatyi A. A., Orlov A. A. Classification of non-destructive testing methods for welded compounds from copper obtained by agitation friction welding [Klassifikaciya metodov nerazrushayushchego kontrolya svarnyh soedinenij iz medi, poluchennyh svarkoj treniem s peremeshivaniem]. Moscow: *Welding and diagnostics*, 2022. No. 3. Pp. 19–24. (rus)
28. Drits A. M., Ovchinnikov V. V., Reztsov R. B. [Defekty, vznikayushchie pri svarke treniem s peremeshivaniem alyuminiyevyh splavov sistemy Al–Mg, i sposoby ih ustraneniya]. *Tekhnologiya legkih splavov*. 2022. No. 4. Pp. 14–25. (rus)
29. Filipov A. V., Tarasov S. Yu., Kolubaev E. A., Rubtsov V. E. Determination of defects in the form of an embedded bad welding after friction stir welding [Opredelenie defektov v vide zaglzhennogo neprovvara posle svarki treniem s peremeshivaniem]. *Fundamental research*. 2015. No. 6. Pp. 296–310. (rus)
30. Drits A. M., Ovchinnikov V. V. Influence of sub-welds on properties of welded joints of alloys 1565h and 1460 made by argon-arc welding and friction welding with agitation [Vliyaniye podvarok na svoystva svarnyh soedinenij splavov 1565ch i 1460, vpolnennyh argonodugovoj svarkoj i svarkoj treniem s peremeshivaniem]. *Tekhnologiya legkih splavov*. 2018. No. 4. Pp. 65–77. (rus)
31. Gibson B. T. [et al.]. Friction stir welding: Process, automation and control. *Journal of manufacturing processes*. 2014. Vol. 16. Iss. 1. Pp. 56–73.
32. Sutton M. A., Yang B., Reynolds A. P., Taylor R. Microstructural studies of friction stir welds in 2024–T3 aluminum. *Materials science and engineering*. 2002. Vol. 323. Pp. 160–166.
33. Rubtsov V., Tarasov S., Kolubaev E., Psakhie S. Ultrasonic phase array and eddy current methods for diagnostics of flaws in friction stir welds. *AIP conference proceedings*. 2014. Vol. 1623. Pp. 539–542.
34. Shipsha V. G. New approach in the technology of vortex control of weld seams of liners, obtained by friction welding [Novyj podhod v tekhnologii vihretkovogo kontrolya svarnyh shvov lejnerov, poluchaemyh frikcionnoj svarkoj]. *Territoriya NDT*. 2016. No. 4. Pp. 36–38. (rus)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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



---

---

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

---

---

**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,  
e-mail: pavelpetrov@list.ru

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

**СТРОИТЕЛЬСТВО**

---

---

**CIVIL ENGINEERING**



УДК 712-1

<sup>1,\*</sup>Николаева Е. К., <sup>1</sup>Никишина И. А., <sup>2</sup>Меняйло Д. В.

<sup>1</sup>Донбасский государственный технический университет,

<sup>2</sup>Мосинжпроект

\*E-mail: ledilenanik@gmail.com

## СОВРЕМЕННЫЙ ДИЗАЙН ПАЛИСАДНИКА ДЛЯ МНОГОКВАРТИРНОГО ЗДАНИЯ

*В данной статье обосновывается необходимость профессиональной разработки композиционного решения палисадника. Рассмотрены основные факторы, важные для проектирования палисадников. Приведены теоретические концепты палисадников. Разработан проект палисадника для конкретной градостроительной ситуации.*

**Ключевые слова:** палисадник, дизайн, композиция, проектирование, теоретические концепты, придомовая территория.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Экологический каркас города как средовосстанавливающая система обеспечивает комфортность условий проживания людей в городе, поскольку регулирует (в определенных пределах) газовый состав воздуха и степень его загрязненности, климатические характеристики городских территорий, снижает влияние шумового фактора и является источником эстетического восприятия. По своей структуре экологический каркас города — система многоуровневая, содержит в своем составе элементы различной величины и различной периодичности посещения. Безусловным лидером по частоте контактов горожан с природной средой являются придомовые палисадники многоэтажных зданий.

Палисадник — это визитная карточка любого дома, он делает эффектнее и приятнее вид из окна. Яркие цвета в нем настраивают на позитив и повышают настроение. Поэтому проектирование палисадников является важной и ответственной задачей. Однако анализ придомовых участков многоквартирных зданий в г. Алчевске показывает, что данная территория отдана на откуп равнодушных горожан. Пытаясь привнести прекрасное в нашу жизнь, ландшафтные активисты не останавливаются на выращивании цветов.

Среди клумб местные умельцы размещают пальмы из пластиковых бутылок, лебедей из автомобильных покрышек, грибы из старых мисок. А самые пугающие творческие порывы — инсталляции из выброшенных детских игрушек, в основном плюшевых (рис. 1). И такая негативная ситуация в благоустройстве палисадников сложилась не только в г. Алчевске. Так, врач-эпидемиолог г. Минска О. Зенова вызвала обеспокоенность по этому поводу: «Многие горожане, которые считают игрушки во дворах милыми, не задумываются о том, насколько заразным может быть плюшевый зверь... Плюшевые игрушки, выставленные на улицу, могут быть носителями множества возбудителей — от грибов до гельминтов. Фактором передачи возбудителей является почва, загрязненная фекалиями домашних животных. А для маленьких детей, у которых еще не сформированы гигиенические навыки, особую опасность могут представлять токсокары. Попадая в организм ребенка, яйца токсокары пробуравливают кишечник, попадают в кровотоки и разносятся по всем органам и тканям, образуя гранулемы» [1].

Учитывая вышеизложенный материал, авторы считают необходимым привлечь к благоустройству палисадников профессиональных дизайнеров и ландшафтных архитекторов. И такая возможность в Ал-

## СТРОИТЕЛЬСТВО

чевске имеется, поскольку ДонГТУ более 20 лет ведет подготовку архитекторов, а в 2020 г. открыто новое направление подготовки — «Дизайн архитектурной среды».

**Постановка задачи.** Авторы поставили перед собой задачу разработать современный дизайн палисадника многоквартирного жилого дома с применением долговечных и эстетичных материалов. В качестве объекта творческого эксперимента авторами выбран палисадник пятиэтажного жилого дома по адресу ул. Гмыри, д. 21а.

Немаловажную роль в выборе объекта эксперимента сыграло наличие в палисаднике смотрового канализационного колодца, создающего неэстетичный вид из окон квартир на его крышку (рис. 2).

**Изложение материала и его результаты.** Размеры и форма палисадников многоквартирных зданий определяются отведенной в придомовой территории землей, взаимным расположением здания и элементов городской транспортной системы, историческим периодом возведения дома.

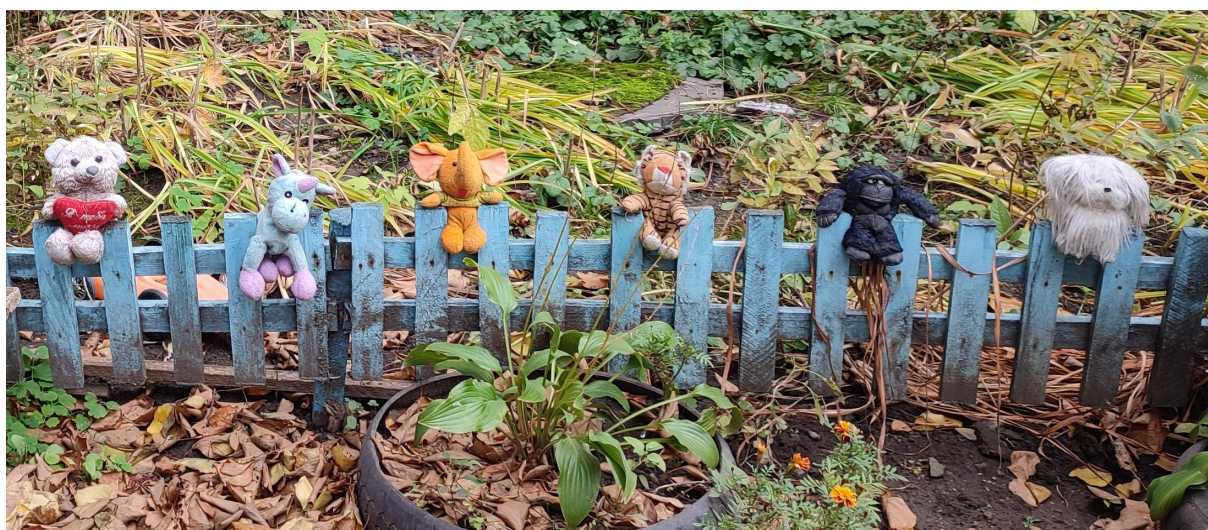


Рисунок 1 — Непрофессиональное оформление палисадников в г. Алчевске





Рисунок 2 — Канализационный колодец в палисаднике по адресу ул. Гмыри, д. 21а

Концептуальное решение палисадника зависит от ряда факторов (нормативных, климатических, градостроительных). Нормативные документы регулируют расположение растений относительно здания: деревья в палисадниках высаживают не ближе 5–6 м от стен дома, кустарники — 1,5 м [2]. Планировочные приемы должны учитывать небольшие размеры проектируемого объекта и чрезмерную насыщенность городского пространства прямыми линиями и углами.

С целью нивелирования негативного воздействия прямолинейных форм следует применять следующие композиционные приемы:

- принцип диагональности — все основные линии, ограничивающие планировочные плоскости параллельны или перпендикулярны диагоналям участка, что зрительно увеличивает объект дизайна (рис. 3);

- шести- и восьмиугольные формы также уведут проектировщика от скучных прямых линий (рис. 4);

- планировочные формы, тяготеющие к кругам, — для планировки основных плоскостей участка могут применяться круги, эллипсы, овалы, сегменты (рис. 5, 6). При выборе растений следует учитывать сезонность: палисадник не должен быть унылым и запущенным осенью и зимой, как на рисунке 7. Необходимо использовать растения, красивые в любое время года, а также добавить малые архитектурные

формы и поэкспериментировать с освещением. А чтобы палисадник не доставлял хлопот, необходимо подбирать эффектные и неприхотливые растения [3].

Немаловажным вопросом в ландшафтном дизайне является возможность полива растений. В засушливых районах или в районах, где существует нехватка воды, используют оформление ландшафта в стиле ксерискейп. Для создания такого стиля посадки выбирают растения, которые сохраняют воду. К ним относятся многолетники (ластовень, лаванда, тимьян, люпин, лилия, водосбор, хризантема) и однолетники (астра, бессмертник, цинния, декоративная капуста, ноготки, космея, бегония, шалфей). Для сохранения влаги в почве используется мульча: древесная щепа, дробленый камень, галька.



Рисунок 3 — Диагональные формы в ландшафтном дизайне



Рисунок 4 — Шестиугольные формы в ландшафтном дизайне





Рисунок 5 — Цветочные клумбы Кристины в вильнюсских домах

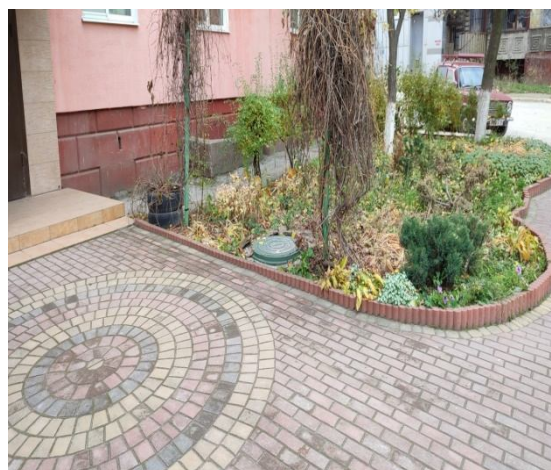


Рисунок 6 — Круглые формы в дизайне придомовой территории (г. Алчевск, ул. Ленина, д. 77)



Рисунок 7 — Существующий палисадник по адресу ул. Гмыри, д. 21а

В соответствии с законами ландшафтной архитектуры возможны следующие варианты решений для палисадника многоквартирного здания [4, 5].

1. Миксбордер. Он включает в себя крупные массивы из многолетников и узкие полосы ежегодного цветочного оформления. При закладке цветника необходимо использовать небольшое количество видов луковичных растений яркого вида. Основной принцип подбора многолетников — по высоте и контрастности листвы и фактуры

(флоксы, ирис, астильба, хоста, бузульник, лилейник, дельфиниум, лилия, манжетка, маргаритка и др.). Для миксбордеров на небольшом земельном участке не рекомендуется использовать растения сложноцветного семейства. Они агрессивно подавляют более нежные цветы. К ним относятся эхинацея, нивяник, садовый тысячелистник.

2. Плоский рокарий. В качестве основы высаживают хвойные деревья или низкорослые кустарники (туя западная, сосна горная, декоративные ели, спиреи, барба-



рисы, кизильник) и почвопокровные растения (армерия, арабис, камнеломка, эдельвейс, флокс шиловидный, очиток и др.). Главное в таком палисаднике — выдержать чувство стиля и лаконичность.

3. Моноцветник — это композиция в палисаднике, составленная из сортов одного вида растений. Для больших размеров используют многолетние травы, которые быстро размножаются (люпин и др.), а на маленьких участках можно высадить циннии, однолетние георгины или настурции.

4. Газон и монокультурная изгородь из кустарников. Они могут стать долгосрочными вложениями, но потребуют тщательного ухода. Для живой изгороди подойдут кустарники: курильский чай, пузыреплодник, дерен белый, жимолость татарская, спирея японская, барбарис.

5. «Сухой ручей» из камней или имитация воды в композиции из цветов и кувшина. Особенно интересна композиция на вытянутой форме участка или на склоне.

Если участок ограничен по площади, то можно создать композицию с керамической вазой, из которой словно вытекает ручей белых или голубых лобелий, алиссума, виолы.

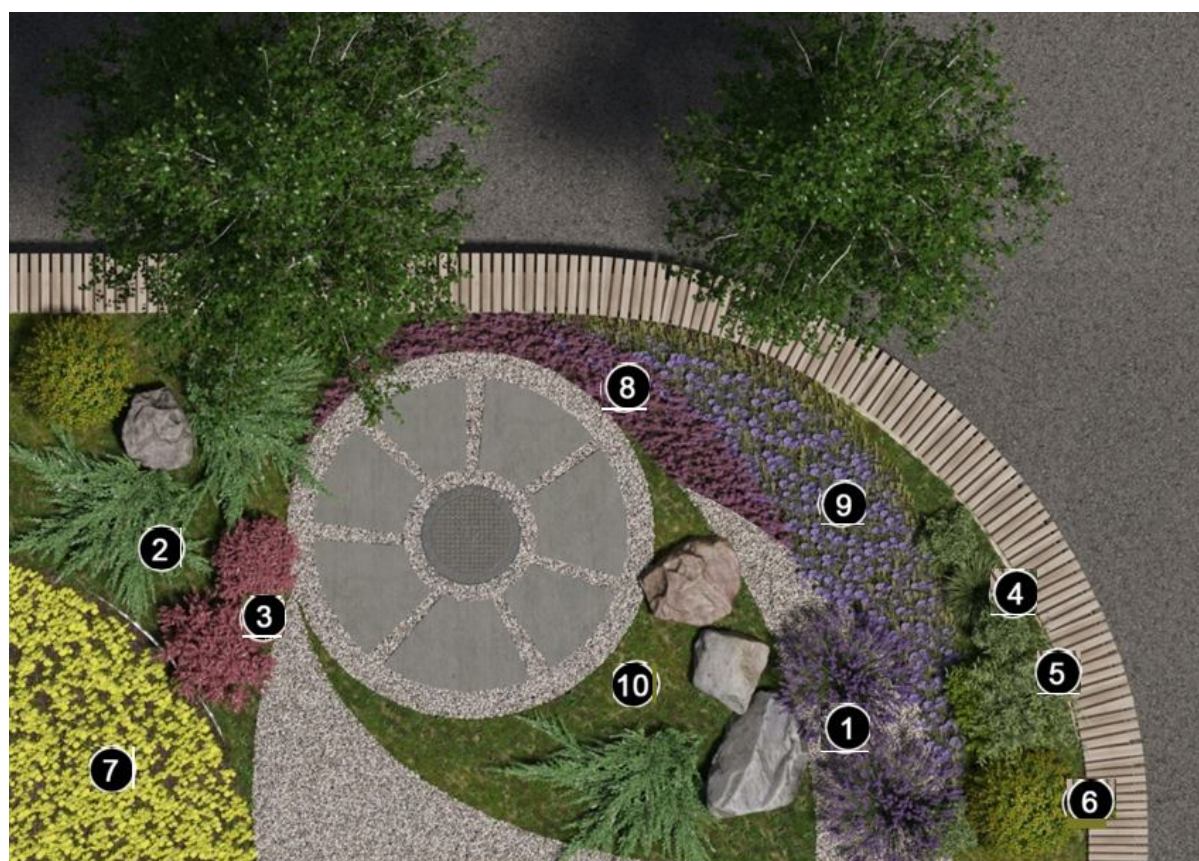
С учетом вышеизложенных положений был разработан дизайн-проект палисадника пятиэтажного жилого дома по адресу ул. Гмыри, д. 21а.

Неблагоприятной и неблагоприятной особенностью данного палисадника является расположение канализационного колодца со всеми вытекающими последствиями: неэстетичный вид из окон и неприятные запахи. Поскольку канализационный колодец перенести не представляется возможным, то было принято решение негатив превратить в позитив, оформив люк в виде большого цветка из бетонных плиток и щебня (рис. 8, 9). Такое решение очень практично: предоставляется удобный доступ рабочих к крышке колодца при сохранности цветов и газонной травы.



Рисунок 8 — Общий вид предлагаемого палисадника





1 — кусты лаванды; 2 — можжевельник казачий; 3 — барбарис; 4 — овсяница;  
5 — бересклет; 6 — спирея японская; 7 — алиссум скальный; 8 — армерия;  
9 — флокс; 10 — газонная трава

Рисунок 9 — План нового палисадника

Для поддержания композиционной идеи с круглым элементом традиционная прямоугольная форма палисадника изменена на закруглённую. В формах цветников также использовались закругленные линии. В качестве обрамления палисадника предлагаются деревянные скамейки. При таком решении места для отдыха хватит всем: и мамам с детьми, и пенсионерам.

Существующие деревья по проекту сохранены, но теперь находятся за пределами палисадника в специальных лунках. При таком решении увеличивается прогулочная зона между домом и микрорайонным проездом.

Цветочная композиция палисадника сформирована с учетом законов цветовой гармонии, ориентации главного фасада здания и минимальных мероприятий по уходу за цветами [5, 6]:

– жёлтый цвет представляет алиссум скальный (низкорослый многолетник, зимостойкий, засухоустойчивый, неприхотливый в уходе);

– розовые оттенки: армерия (многолетник, разведение самосевом, неприхотлив);

– фиолетовые оттенки: флокс (многолетний, сильноветвистый, неприхотливый).

#### Выводы:

1. Творческие порывы горожан по оформлению палисадников и придомовых территорий многоквартирных зданий не должны приводить к тому, чтобы во дворах создавались «кладбища» старых игрушек. Материалы для ландшафтных композиций должны быть долговечными и иметь опрятный внешний вид. В палисадниках не место старым детским игрушкам, которые от воздействия атмосферных осадков приходят в

негодность и начинают гнить, а также поделкам из пластиковых бутылок и шин.

2. При помощи ландшафтного дизайна придомовой территории можно сделать её не только красивой, но эксклюзивной и оригинальной, причём вне зависимости от поры года. Правильно подобранная компо-

зиция растений и элементов благоустройства позволит создать благоприятную среду для отдыха и уюта, повысит уровень комфорта для жителей домов, ведь зелёные зоны придомовых территорий являются маркерами благополучия.

#### **Список источников**

1. Зайку бросила хозяйка. Почему горожане украшают дворы отслужившими свое плюшевыми игрушками [Электронный ресурс] // Беларусь сегодня : [сайт]. [2023]. URL: <https://www.sb.by/articles/strashno-krasivo.html> (дата обращения: 21.10.2023).

2. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89\*. М. : Стандартинформ, 2017. 53 с.

3. Бауэр У. Мой цветущий сад. Простые методы создания клумб, не требующих особого ухода. Белгород : Книжный клуб, 2014. 157 с.

4. Кирьянова Ю. С. Краткая энциклопедия садового дизайна. Современный ландшафтный дизайн вашего сада. М. : АСТ, 2009. 238 с.

5. Хессайон Д. Г. Все о цветах в вашем саду. М. : Кладезь-Букс, 2002. 159 с.

6. Шпон М., Шпон Р. Цветы. Иллюстрированный справочник. Белгород : Книжный клуб, 2013. 255 с.

© Николаева Е. К., Никишина И. А., Меняйло Д. В.

**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 26.10.2023.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Николаева Елена Климовна**, канд. техн. наук, доцент каф. архитектурного дизайна и строительных конструкций

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,

e-mail: ledilenanik@gmail.com

**Никишина Ирина Александровна**, старший преподаватель каф. архитектурного дизайна и строительных конструкций

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

**Меняйло Дмитрий Валентинович**, архитектор 2-й категории

Мосинжпроект,

г. Москва, Россия

**\*Nikolaieva E. K., Nikishina I. A. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, \*e-mail: ledilenanik@gmail.com), Menyailo D. V. (Mosinzhproect, Moscow, Russia)**

#### **CONTEMPORARY GARDENPLOT DESIGN FOR AN APARTMENT BUILDING**

*This article justifies the need for professional development of the gardenplot layout solution. The main factors that are crucial for designing gardenplots are taken into account. Theoretical concepts of gardenplots are given. The project of gardenplot for a specific urban development situation is developed.*

**Key words:** gardenplot, design, layout, projecting, theoretical concepts, curtilage.

## References

1. *The mistress left the bunny. Why the townspeople decorate the courtyards with the service of their cuddly toys [Zajku brosilu hozyajka. Pochemu gorozhane ukrashayut dvory otsluzhivshimi svoe plyushevymi igrushkami]. Belarus segodnya. 2023. URL: <https://www.sb.by/articles/strashno-krasivo.html> (date of treatment: 21.10.2023).*
2. *SP 42.13330.2016. Urban development. Urban and rural planning and development. Revised edition of SNIIP 2.07.01-89\* [SP 42.13330.2016. Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastrojka gorodskih i sel'skih poselenij. Aktualizirovannaya redakciya SNIIP 2.07.01-89\*] M.: Standartinform, 2017. 53 p. (rus)*
3. *Bauer U. My flowering garden. Simple methods of creating flowerbeds that do not require much care [Moj cvetushchij sad. Prostye metody sozdaniya klumb, ne trebuyushchih osobogo uhoda]. Belgorod: Knizhnyj klub, 2014. 157 p. (rus)*
4. *Kiryanova Yu. S. Brief encyclopedia of garden design. Modern landscape design of your garden [Kratkaya enciklopediya sadovogo dizajna. Sovremennyj landshaftnyj dizajn vashego sada]. M.: AST, 2009. 238 p. (rus)*
5. *Khessajon D. G. All about the flowers in your garden [Vse o cvetah v vashem sadu]. M.: Kladez'-Buks, 2002. 159 p. (rus)*
6. *Shpon M., Shpon R. Illustrated handbook [Illyustrirovannyj spravochnik]. Belgorod: Knizhnyj klub, 2013. 255 p. (rus)*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Nikolaieva Elena Klimovna**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Architectural Design and Engineering Constructions  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk Peopole's Republic, Russia,  
e-mail: ledilenanik@gmail.com

**Nikishina Irina Aleksandrovna**, Senior Lecturer of the Department of Architectural Design and Engineering Constructions  
Donbas State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk Peopole's Republic, Russia

**Menyailo Dmitry Valentinovich**, Category 2 Architect  
Mosinzhproect,  
Moscow, Russia

## СОДЕРЖАНИЕ

### НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

*Литвинский Г. Г.*

ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРЕПИ С ГОРНЫМ МАССИВОМ ..... 5

*Князьков О. В., Смекалин Е. С., Денисова Н. А.*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ  
ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОДООТЛИВНОГО КОМПЛЕКСА Ш. «КОМСОМОЛЬСКАЯ» ..... 16

### МЕТАЛЛУРГИЯ

*Кухарев А. Л., Куберский С. В., Кононенко Г. И.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ДУГОВОМ ГЛУБИННОМ  
ВОССТАНОВЛЕНИИ ..... 27

*Митичкина Н. Г., Космина А. В.*

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ПРОБИВКИ ОТВЕРСТИЯ В УСЛОВИЯХ  
СОВМЕЩЕННОЙ ШТАМПОВКИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ ..... 36

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

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

РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ..... 45

*Борисенко В. Ф., Сидоров В. А., Землянский А. И.*

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ..... 55

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

ПОЛУЧЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ..... 68

### СТРОИТЕЛЬСТВО

*Николаева Е. К., Никишина И. А., Меняйло Д. В.*

СОВРЕМЕННЫЙ ДИЗАЙН ПАЛИСАДНИКА ДЛЯ МНОГОКВАРТИРНОГО ЗДАНИЯ ..... 87

## CONTENT

### SUBSURFACE MANAGEMENT

*Litvinsky G. G.*

THE MAIN MODES OF OPERATION AND GEOMECHANICAL PARAMETERS  
OF THE INTERACTION BETWEEN THE LINING AND THE ROCK MASSIF ..... 5

*Knyazkov O. V., Smekalin Ye. S., Denisova N. A.*

DETERMINATION OF A RATIONAL SCHEME FOR FIXING PIPELINES DURING THE  
RECONSTRUCTION OF THE DRAINAGE COMPLEX OF “KOMSOMOLSKAYA” MINE ..... 16

### METALLURGY

*Kukharev A. L., Kuberskiy S. V., Kononenko G. I.*

MODELING OF THE HEAT TRANSFER PROCESS DURING ARC DEEP RECOVERY ..... 27

*Mitichkina N. G., Kosmina A. V.*

SELECTING A RATIONAL METHOD FOR PUNCHING THE HOLE UNDER  
THE DOUBLE-ACTION FORMING OF PIPE BLANKS WITH LIMITED LENGTH ..... 36

### MECHANICAL ENGINEERING

*Kharlamov Yu. A., Denisova N. A., Petrov P. A.*

DEVELOPMENT OF WELDING PROCESSES OF STRUCTURAL MATERIALS ..... 45

*Borisenko V. P., Sidorov V. A., Zemlyanskiy A. I.*

ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS  
IN INDUSTRIAL PRACTICE ..... 55

*Kharlamov Yu. A., Petrov P. A., Orlov A. A.*

OBTAINING WELDS BY FRICTION STIR ..... 68

### CIVIL ENGINEERING

*Nikolaieva E. K., Nikishina I. A.*

CONTEMPORARY GARDENPLOT DESIGN FOR AN APARTMENT BUILDING ..... 87

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

**UDC 622(06) + 669(06) + 621 + 658.58 + 712-1**

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

**Scientific journal**

Issue 1 (75) 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 № 4 dated 24.11.2023)*

*Added to scientometrical database of RSCI*

Format 60×84¼  
Conventional printed sheet 12  
Order № 205

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  
94204

e-mail: [info@dstu.education](mailto: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.  
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.  
Kuberskiy S. V. — PhD in Engineering, Prof.  
Dolzhikov V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.  
Denischenko P. N. — PhD in Engineering, Prof.  
Davidenko A. I. — 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