

МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ

научно-технический журнал





Журнал индексируется системами РИНЦ и Google Scholar.
Сведения о журнале публикуются в международной системе «Ulrich's Periodicals Directory»

Редакционная коллегия

Главный научный редактор

Корчунов А.Г. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, доктор технических наук.

Заместитель главного научного редактора

Анцупов В.П. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, доктор технических наук.

Бобарикин Ю.Л. – «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», доцент, кандидат технических наук, г. Гомель, Республика Беларусь.

Горбатюк С.М. – Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», профессор, доктор технических наук.

Кузьминов А.Л. – «Череповецкий государственный университет», профессор, доктор технических наук.

Раскатов Е.Ю. – «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор, доктор технических наук.

Трофимов В.Н. – «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор, доктор технических наук.

Ответственный редактор

Слободянский М.Г. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доцент, кандидат технических наук.

Журнал основан в 2012 г.
Периодичность выхода – 2 номера в год.

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл.,
г. Магнитогорск,
пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
издательский центр.

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл.,
г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 29.12.2022. Заказ 308.
Тираж 300 экз.

Уважаемые коллеги!

В декабре 2022 года журнал «**Механическое оборудование металлургических заводов**» отмечает свой 10-летний юбилей.

Основная идея организации специализированного издания заключалась в необходимости предоставить профессиональному сообществу платформу для обсуждения новых трендов, перспектив развития и инноваций в их профессиональной сфере деятельности.

Ежегодно на страницах журнала публиковались научно-технические и практические материалы, отражающие достижения в различных научных направлениях и возможности их применения в металлургическом машиностроении. Сегодня издание публикует результаты исследований по широкому спектру проблем в области проектирования, эксплуатации и реновации металлургических машин и оборудования. Наряду с традиционными направлениями, активно публикуются результаты исследований, полученные с использованием современных систем автоматизированного проектирования, методов прямого и реверсивного инжиниринга с использованием 3D-моделирования и визуализации, 3D-сканирования и 3D-печати, элементов технологий виртуальной и дополненной реальности VR/AR в проектировании промышленного металлургического оборудования.



Представленный выпуск журнала «Механическое оборудование металлургических заводов» посвящен 10-летию научного издания. В статьях юбилейного номера нашли свое отражение результаты оригинальных научных исследований и производственный опыт проектирования, эксплуатации и реновации металлургических машин и оборудования. Среди авторов известные ученые и специалисты, а также молодые исследователи, начинающие свой научный путь. Такая связь различных поколений, ведущих научных школ и производства, способствует укреплению и развитию творческого сотрудничества в области металлургического машиностроения. Большинство научных статей подкреплены промышленным внедрением результатов.

Коллектив редакционной коллегии выражает признательность ученым и специалистам-практикам за активное и заинтересованное участие в формировании юбилейного номера журнала. Надеемся на плодотворное сотрудничество и научные дискуссии на страницах издания в будущем.

Главный научный редактор
профессор, доктор технических наук

А.Г. Корчунов

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

С.М. Вайцехович, Ю.В. Власов Совершенствование металлургического оборудования для получения тугоплавких материалов методами СВС-баротермии	4	S.M. Vaitsekhovich, Yu.V. Vlasov Improving metallurgical equipment to produce high melting materials by using SHS barothermy methods	4
В.А. Кукареко, А.Н. Григорчик Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и дюрометрические свойства композиционных покрытий «сталь 70 + АК12», полученных методом высокоскоростной металлизации	14	V.A. Kukareko, A.N. Grigorchik Effect of annealing on the structural phase state and durometric properties of "steel 70 + AK12" composite coatings produced by high-speed metallization	14
М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов Об использовании пневмогидравлического аккумулятора для сохранения энергии упругих деформаций при работе гидравлического пресса	21	M.E. Goido, V.V. Bodrov, R.M. Bagautdinov Using a hydropneumatic accumulator to save elastic strain energy in the operation of hydraulic presses	21
Д.В. Туманов, А.Л. Кузьминов Разработка и промышленное применение манипулятора с гидроподжимом для установки и замены защитной трубы на установке непрерывной разливки стали	27	D.V. Tumanov, A.L. Kuzminov Development and industrial use of the hydraulic hold-down manipulator to install and change the shroud at the continuous casting machine	27
Г.И. Трифонов Применение многофакторного эксперимента при исследовании свойств покрытий, нанесенных плазменным методом напыления	32	G.I. Trifonov Multiple-factor experiments applied to study properties of coatings applied by plasma spraying	32
В.В. Точилкин, А.Н. Еремин, И.М. Ячиков, Г.А. Подосян Модернизация металлургического агрегата - промежуточного ковша МНЛЗ с учетом особенностей движения потоков стали в ковше	38	V.V. Tochilkin, A.N. Eremin, I.M. Yachikov, G.A. Podosyan Modernizing the metallurgical facility, a tundish of a continuous casting machine, factoring into steel flows in the tundish	38
М.П. Шишкарев, М.Д. Гавриленко Синтез адаптивной фрикционной муфты с комбинированной обратной связью	42	M.P. Shishkarev, M.D. Gavrilenko Synthesis of an adaptive friction clutch with a combined feedback	42
Н.С. Кравцов, И.В. Тимохин Влияние фреттинг-износа на напряжённо-деформированное состояние цилиндров мощных гидравлических прессов	52	N.S. Kravtsov, I.V. Timokhin Effect of fretting wear on the stress and strain state of cylinders of heavy hydraulic presses	52
В. Е. Мельникова Актуальность применения антифрикционных твердосмазочных покрытий в металлургии	58	V.E. Melnikova Relevance of applying anti-friction solid lubricating coatings in metallurgy	58
В.Г. Артюх, Н.В. Корихин, Н.В. Чернышева, И.Н. Чigareва, А.И. Круглов Функциональная прочность машин и основные технические заблуждения, с ней связанные	64	V.G. Artyukh, N.V. Korikhin, N.V. Chernysheva, I.N. Chigareva, A.I. Kruglov Functional strength of machines and main relevant misleading technical beliefs	64



УДК 621.762.4.043: 546.07: 536.46.002

С.М. Вайцехович, Ю.В. Власов
АО «НПО «Техномаш» имени С.А. Афанасьева»
г. Москва, Россия
E-mail: ask-mlad@mail.ru
Дата поступления 01.11.2022

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ СВС-БАРОТЕРМИИ

Аннотация

Предложено оборудование для горячего прессования синтетических заготовок в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для проведения технологического процесса, объединяющего силовое и температурное воздействие на синтетический продукт, образованный в результате автоволнового режима горения твёрдых тонкодисперсных порошков, жидкостей и газов, получивший название «СВС–баротермия».

Ключевые слова: СВС-баротермия, пресс-форма, стартовое уплотнение.

Введение

В работе предложен подход к изготовлению тугоплавких, труднодеформируемых материалов и изделий на их основе инновационным методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза-баротермии.

Основная часть

Недостатком устройств, используемых в СВС-технологии, является низкое качество прессовки в связи с недостаточной герметизацией матричной полости и большого теплоотвода в окружающую среду, неравномерного физико-механического состояния отдельных частей и продукта синтеза в процессе деформирования, так как процесс синтеза растянут во времени и образование синтетического продукта происходит послойно. На поверхности изделия, контактирующего с «холодными» стенками штампового инструмента, появляется слой непрореагировавшего исходного реагента с различной степенью неполноты превращения. Поэтому отходы прессования составляют 50÷65%, а примесные газы, например, оксид углерода (СО), оксид азота (NOx), углеводороды (CxHy), образованные в результате термосинтеза, загрязняют окружающую среду [1].

Время горения (образование синтетического продукта) на порядок и более превышает время прохождения волны горения (синтеза). Послойное прохождение волны горения определяет послойное химическое превращение исходных реагентов в конечный продукт, поэтому в момент окончания процесса синтеза, в месте начала инициирования синтеза, синтетический продукт затвердевает в виде арочных конструкций, что оказывает существенное неоднородное сопротивление деформированию и влияет на качество продукта [2].

Техническая новизна предлагаемого устройства заключается в получении деталей из изотермической порошковой смеси и повышении качества синтетической заготовки путём совмещения скорости синтеза горения со скоростью его уплотнения. При этом, реализуется послойная подпрессовка синтезирующегося продукта в зоне химического превращения, расширяется номенклатура деталей путём регулирования пористости конечного продукта и утилизируются примесные газовые выбросы продуктов синтеза [3].

Подбор исходных реагентов способных к экзотермическим реакциям горения основан на явлении распространения фронта горения в смесях порошков тугоплавких химических элементов, приводящих к образованию тугоплавких соединений. В работе [4] проведена систематизация

продуктов горения как после проведения теплового взрыва или послойного горения твёрдых химических соединений, так и после нанесения покрытий в результате газотранспортных реакций. Построены сводные таблицы возможных комбинаций продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и реагентов (металлов и смесей) из металлов со II по VIII групп периодической системы химических элементов (таблица Д.И. Менделеева) в соответствии с третьим принципом физико-химического анализа – принципом совме-

стимости, и с учётом их фазовых превращений при высоких давлениях, что позволяет, в первом приближении составлять пропорции состава исходных реагентов с последующей доводкой с учётом заданных конечных параметров синтетического изделия.

Для реализации технологии СВС-баротермия разрабатывается соответствующее оборудование, в том числе устройство, представленное на рисунке 1.

Устройство для СВС-баротермии состоит из контейнера 1, верхнего 2 и нижнего пневмоцилиндра 3 и гидроцилиндра 4.

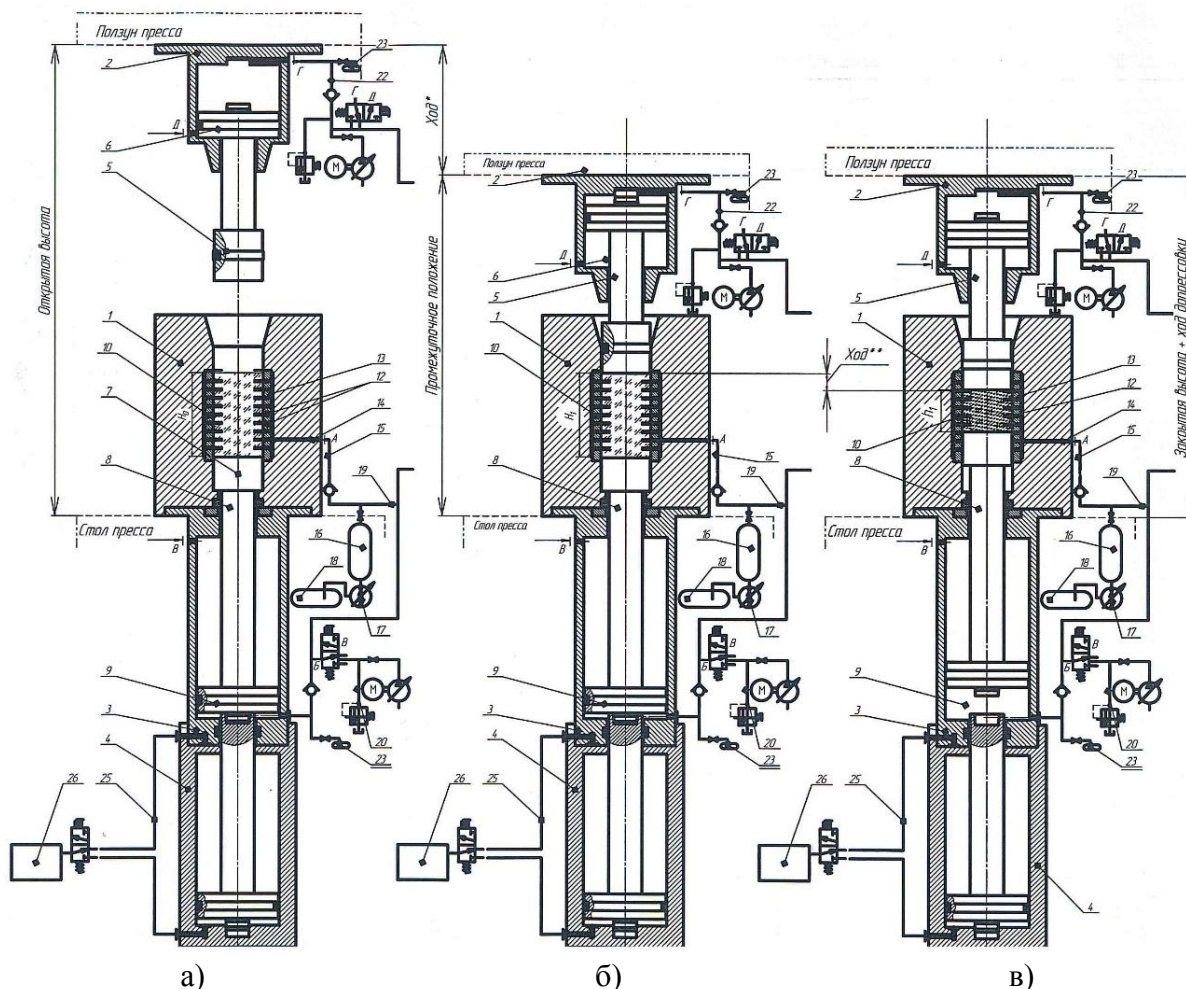


Рисунок 1. Схема работы устройства СВС-баротермии - размещение брикета, инициирование горения, стартовое уплотнение синтетической заготовки
 а – размещение брикета, исходное положение; б – инициирование режима горения;
 в – стартовое уплотнение по высоте h_1 в процессе горения, уплотнение продуктов синтеза адсорбированными газами, образующимися в результате термосинтеза, а также примесными летучими продуктами; ход* – перемещение верхнего пуансона до контакта его с брикетом; ход** – перемещение верхнего пуансона при стартовом уплотнении.

К верхнему пневмоцилиндру 2 прикреплён верхний пуансон 5, опирающийся на шток плунжера 6. К нижнему пневмоцилиндру 3 прикреплён нижний пуансон 7, опирающийся на шток 8 плунжера 9. Верхний 5 и нижний 7 пуансоны расположены внутри матрицы 10, перфорированной отверстиями. В матрицу 10 размещают брикет порошковой заготовки из реакционной смеси 11, горение которой сопровождается выделением летучих продуктов синтеза (примесных газов).

Матрица 10 имеет радиальные каналы 12 для фильтрации газов, а контейнер 1 – газосборник 13 и канал 14, сообщающий эту полость посредством газовой магистрали 15 с пневмобаком 16, в котором постоянно поддерживается остаточное давление, ниже атмосферного за счёт регулируемого вакуумного насоса 17, сборника давления 18, соединённого, в свою очередь, через пневмомагистраль 19 с системой нагнетания 20 пневмоцилиндра 3, на который опирается нижний пуансон 7. Верхний пуансон 5, через шток плунжера 6, приводится в движение системой нагнетания 21, которая через пневмомагистраль 22 поддерживает в пневмоцилиндре 3 постоянное давление, превышающее атмосферное.

Нижний гидроцилиндр 4 соединён с гидравлической магистралью 24 с гидравлической станцией 25.

После извлечения отпрессованной детали 27 (рисунок 2 б) нижний пуансон 7 возвращается в исходное положение, при этом примесные газы, скопившиеся в полости пневмоцилиндров, утилизируются в специальные вакуумные баки 23.

Устройство оснащено манометрами, датчиками давления для регистрации работы пневмосистем, реагирующих на перепад давления при термосинтезе заготовки при прессовании детали (рисунки 1 в, и 2 а) и удалении её из матрицы 10 (рисунок 2 б).

Последовательность технологических шагов:

- шихтовую заготовку 11 из экзотермических реагентов, способных химически реагировать между собой с выделением

тепла, в виде порошковой смеси или брикета насыпают (устанавливают) на нижний пуансон 7 матрицы 10;

- ползуном пресса опускают верхний пневмоцилиндр 2 вместе с верхним пуансоном 5, который входит в матрицу 10, создавая при этом герметичный замкнутый объём для полости газосборника 13;

- настраивают в газовой магистрали, в газосборнике 13 и в пневмобаке 16 давление на 10-20% ниже атмосферного и посредством вакуумного насоса 17 поддерживают остаточное давление;

- инициируют реакцию горения [5, 6]. Газы, образующиеся в процессе синтеза, нагреваются до температур $\square 300^{\circ}\text{K}$ и через радиальные каналы скапливаются в газосборнике 13 и по каналу 14 через газовую магистраль 15 поступают в пневмобак 16;

- по мере прохождения волны горения по высоте и объёму исходной заготовки давление газов увеличивается на порядок, при этом синтезированный материал в узком интервале времени имеет низкую прочность и легко смыкается под давлением торцов верхнего и нижнего пуансонов, образуя твёрдый раствор синтезированного продукта составом (карбиды, бориды, силициды) в зависимости от исходных компонентов, которые, остывая, образуют монолит;

- образующиеся газы под действием создающегося ими давления, поступают в вакуумированную зону под поршни пневмоцилиндров и начинают их перемещать, уплотняя синтезирующийся продукт;

- перемещение пуансонов способствует послойному уплотнению синтетического продукта горения, постоянно смещает образующиеся в процессе горения конгломераты тугоплавких соединений вдоль боковых стенок пресс-инструмента, что позволяет исключить «сваривание» заготовки с инструментом, сократить теплоотвод и уменьшить силовой режим прессования. Для заготовок средних размеров массой до 1 кг, высота которых по отношению к условному диаметру составляет единицу или более, снижение осевой нагрузки прессования уменьшает вероятность обра-

зования дефектов и повышает производственную стойкость деформирующего инструмента.

Если не проводить послынную подпрессовку, то в конце стадии горения увеличивается локальная пористость, устранить которую средствами механического воздействия не представляется возможным.

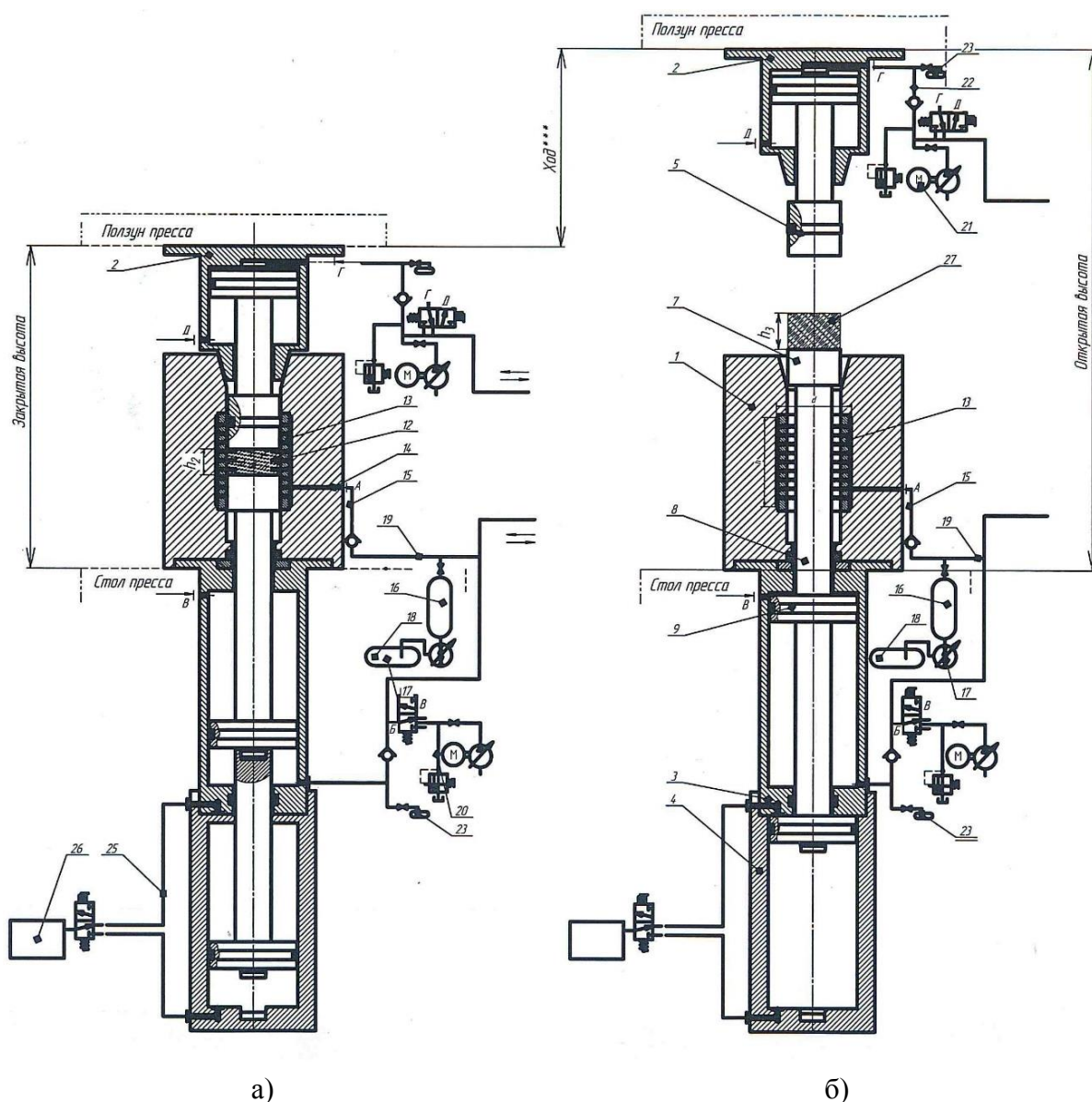


Рисунок 2. Схема работы устройства СВС-баротермии – допрессовка и удаление синтетической заготовки

а – момент допрессовки синтетической заготовки h_2 прессовым оборудованием;
 б – момент извлечения синтетической заготовки, h_3 ; ход *** – величина хода гидравлического пресса при извлечении синтетической заготовки

Работа устройства:

Матрица 10, газосборник 13 и рабочие области пневмоцилиндров 2 и 3 вакуумируются, посредством вакуумного насоса 17, за счёт пневмобака 16 поддерживается остаточное давление, которое меньше атмосферного.

1. Откачиваем насосом 17 воздух из газосборника 13.

Так как поверхность матрицы перфорирована отверстиями 12, происходит вакуумирование матрицы 10, удаляется воздух из рабочих зон поршней пневмоцилиндров 2 и 3.

2. Перекрываем вентиль у пневмобака 16.

Остаточное давление внутри пневмобака 16, газовой магистрали, матрицы 10 и газосборника 13 выравнивается.

3. Иницилируем горение шихтовой заготовки.

Образующиеся в процессе синтеза адсорбированные газы, а также примесные летучие продукты термосинтеза перетекают по газовой магистрали 19 в рабочие зоны пневмоцилиндров 2 и 3 и оказывают давление на их плунжеры, которые начинают перемещать нижний 7 и верхний 5 пуансоны, послойно уплотняя синтетический продукт.

По окончании горения устанавливается равновесие между давлением газа внутри синтезируемой заготовки и внешним воздействием пуансонов. Равновесие давлений способствует установлению баланса, обеспечивающего образование заданных геометрических размеров пор внутри синтезируемой заготовки. В предварительно скомпактированном синтетическом продукте не происходит скопления газовых пузырей, разрывающих заготовку изнутри.

4. Открываем вентиль у пневмобака 16.

Газы, скопившиеся в газосборнике, свободно перемещаются по газовым магистралям 15, 19, 22 в пневмобак 16 для сброса давления в газосборнике 18.

5. Включаем гидроцилиндр 24 и механизм перемещения ползуна пресса.

6. Допрессовываем синтетический продукт синтеза (рис. 2 а).

По окончании формирования синтетической заготовки ползун пресса поднимают, при этом верхний пуансон занимает исходное верхнее положение, а нижний пуансон выталкивает синтезированную деталь наверх, при этом освобождается место для удаления детали из устройства СВС-баротермии.

Примеры реализации технологии СВС-баротермии

Пример №1

Получение изделия диаметром 80 мм и высотой 120 мм из синтетического твёрдосплавного инструментального материала

марки СТИМ, содержащего 70% твёрдой карбидной фазы TiC .

Изделие предназначено для деформирующего инструмента, в частности ступенчатого пуансона, работающего в экзотермических условиях при обработке никелевых сплавов. Исходный материал следующего состава, мас. %: титан 56, никель 20, молибден 10, углерод - остальное.

Технология изготовления синтетического силового деформирующего инструментах.

Исходную порошковую заготовку уплотняют давлением 392 МПа.

В стенке матрицы выполнены отверстия диаметром 1,2 мм. Перед поджогом на торец заготовки укладывают подпружиненный диск (пуансон) массой 25 кг., осуществляющий давление на спрессованную в брикет шихтовую заготовку равно $\rho = 0,1 \div 0,05$ МПа. Иницирование реакции горения осуществляют через токопроводящую металлическую проволоку, установленную на торце заготовки. Одновременно с образованием волны горения и каналом её перемещения, вдоль высоты брикета, начинают перемещать пуансон со скоростью 3 мм/с. Скорость волны горения составляет 6,3 мм/с. Время горения брикета составляет 35 с. За это время пуансон, перемещаясь, уменьшил высоту брикета на 23%. В момент окончания горения пуансон начинают перемещать со скоростью 5 м/с, при этом давление составляет порядка 0,08 МПа, а высота продукта горения уменьшилась ещё на 12%. Затем, по мере возрастания сопротивления синтетического материала, усилие деформирования, а скорость приложения деформирующей нагрузки уменьшаться.

На конечной стадии деформирования скорость перемещения ползуна пресса составляла 0,01 м/с, а передаваемое им давление достигло 400 МПа, при этом высота синтетического продукта горения уменьшилась ещё на 25%.

После термообработки образцы, вырезанные из изделия, имели следующие физико-механические свойства: плотность 6,3 г/см³; предел прочности на сжатие 500 кгс/мм²; предел прочности на изгиб 160 ÷ 170 кгс/мм².

В таблице 1 приведены другие варианты технологии получения силового деформирующего инструмента из синтетического твёрдосплавного инструментального материала марки СТИМ, содержащего 70% твёрдой карбидной фазы TiC с варьированием параметров 1 и 2 стадий деформирования.

На рисунке 3 представлена работа пресс-формы для получения ступенчатого пуансона.

В качестве исходного материала использовали реакционноспособную смесь диборида титана (TiB_2) состава: боридно-

карбидной керамики ($80\% TiB_2 + 20\% MoC$).

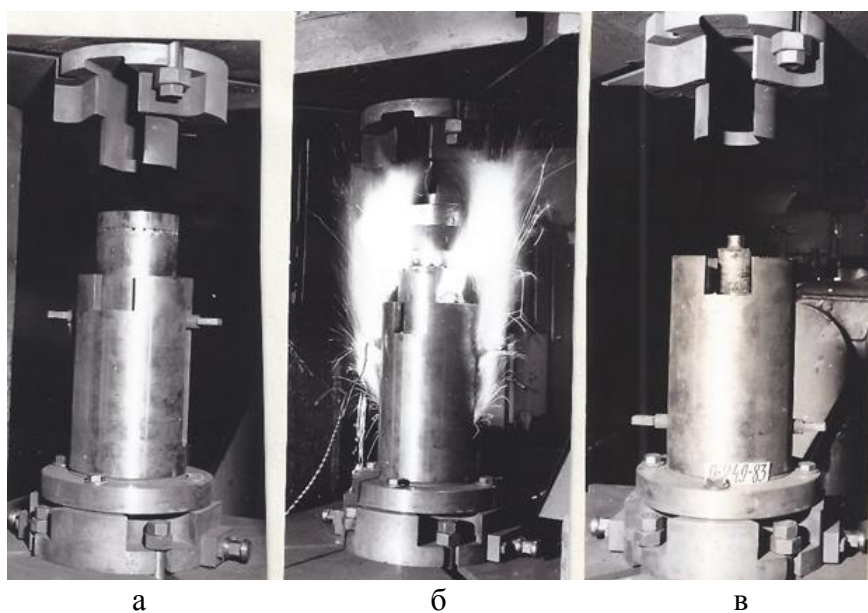
Порошковую смесь перемешивали в смесителе и сушили в вакуумном шкафу. Приготовленную смесь помещали в матричную полость устройства для прессования. Насыпная плотность смеси составляла $1,3 \div 1,4 \text{ г/см}^3$, высота засыпки 100 мм, наружный диаметр 281 мм, внутренний – 210 мм.

Порошковую смесь уплотняли пуансоном для получения компактного брикета. Исходная плотность брикета $3,3 \div 3,5 \text{ г/см}^3$.

Таблица 1

Примеры получения изделий из экзотермической шихтовой заготовки заявленным способом для граничных и промежуточных значений параметров.

№ п/п	Состав шихты, %	1 стадия деформирования Давление, МПа	2 стадия деформирования Давление, МПа	Физико-механические свойства изделий				
				плотность, г/см ³	прочность, $\sigma_{из}$, кгс/мм ²	прочность, $\sigma_{сжк}$, кгс/мм ²	твёрдость, HRA	ударная вязкость, кгс·м/см ²
1	Ti – 56,0; Ni – 20,0; Mo – 10,0; C – 14.	1,0	100	6,3	160÷170	450÷500	91÷93	0,1÷0,15
		0,5	150					
		0,1	300					
		0,05	400					
2	Ti – 57,6 (ПТМ); Cr – 13,4 (хром ПХ1С) ПХ20Н80)– 12,4 (Нихром); C – 16,6	31,0	100	5,37	78÷80	450÷500	91÷92,5	0,15÷0,2
		0,5	150					
		0,1	300					
		0,05	400					



а – исходное положение,
б – момент реакции горения,
в – извлечение синтетической заготовки.

Рисунок 3. Этапы работы устройства СВС-баротермии:

Пример №2

Получение твёрдосплавной заготовки для бандажа вала холодной прокатки медной проволоки. Диаметр валков чистовых клетей 280÷300 мм, скорость прокатки до 9 м/с, температура медной катанки 300÷400°C, прокатываемый материал – медь марки М1, температура валков 100÷150°C, температура смазочно-охлаждаемой жидкости (СОЖ) 60÷70°C.

Не раскрывая матричной полости устройства, проводили инициирование реакции горения. Пуансон был подпружинен и создавал давление в пределах 0,05÷1,0 МПа. Скорость прохождения волны горения составляла 10÷11 мм/с, время горения брикета заготовки - 12÷13 с. При синтезе смеси наблюдалась высокая интенсивность реакции СВС, градиенты температуры составляли 1500град/мм, а скорость изменения 25000 град/с. За период горения температура начальных участков понизилась на 580÷780°C.

После периода выдержки длительностью 3,3 с и начала перемещения пуансона, по толщине заготовки образовался перепад температуры порядка 610÷870°C. Через 15 с после инициирования режима горения произвели деформацию продукта синтеза, высота синтетической заготовки уменьшилась на 10% по отношению к исходной высоте.

Скорость перемещения пуансона была постоянна и составляла порядка 0,1

м/с, давление на рабочем торце пуансона на всём пути деформирования изменялось от 0,005 до 1,0 МПа. После того, как давление на пуансоне достигло 1,0 МПа, высота уплотнённого продукта синтеза составила 36 мм. В дальнейшем скорость перемещения пуансона уменьшилась на порядок и составила 0,01 м/с. При указанной скорости произошла допрессовка продукта синтеза усилием прессового оборудования давлением 50÷400 МПа.

По окончании прессования синтетического продукта горения полученная заготовка имела следующие размеры: наружный диаметр 283 мм; внутренний диаметр 208 мм; высота 30 мм.

После остывания заготовки в термостате, последующей шлифовки и термообработки изделие имело следующие размеры: наружный диаметр 280 мм; внутренний диаметр 212 мм; высота 28 мм.

Образцы, вырезанные из изделия, имели следующие физико-механические характеристики: плотность 4,38 кг/м³; модуль Юнга 54000 кг/мм²; коэффициент линейного расширения 4,6·10⁻⁶ град⁻¹; предел прочности на сжатие 3,5÷3,7 ГПа; твёрдость по шкале А. Роквелла 86÷87 ед; предел прочности на изгиб 60÷70 кгс/мм².

В таблице 2 приведены примеры получения изделий из экзотермической шихтовой заготовки заявленным способом для граничных и промежуточных значений параметров.

Таблица 2

Примеры получения изделий из экзотермической шихтовой заготовки заявленным способом для граничных и промежуточных значений параметров.

№ п/п	Состав шихты, %	1 стадия деформирования Давление, МПа	2 стадия деформирования Давление, МПа	Физико-механические свойства изделий				
				плотность, г/см ³	прочность, $\sigma_{сж}$, кгс/мм ²	прочность, $\sigma_{из}$, кгс/мм ²	твёрдость, HRA	ударная вязкость, кгс·м/см ²
1	TiB ₂ – 80; MoC – 20.	1,0	50	4,38÷	356-377	60-70	86-87	÷
		0,5	150					
		0,1	400					
2	Ti – 57,6; Ni – 10; Cr – 15,6; C – 16,8.	1,0	50	5,37÷	-	90-100	92,5-93,0	0,09÷0,1
		0,5	150					
		0,1	300					
		0,05	400					

Пример №3

Получение ступенчатого пуансона рабочим диаметром 80 мм, высотой 120 мм. В качестве исходного материала (шихты) использовали титан 56%, никель 20%, молибден 10%, бор – остальное. Пресс-форма содержала контейнер, матрицу и два направленных навстречу друг другу пуансона.

Пресс-форму установили на гидравлический пресс усилием 980 кН. Прессование провели в пресс-форме двустороннего обжатия, верхний пуансон жёстко закрепили к ползуну пресса, нижний – установили на шток плунжера и дополнительно подпружинили нагрузкой усилием порядка 0,05 МПа, при этом опорная торцевая поверхность нижнего пуансона опиралась на шток плунжера и имела возможность перемещаться под действием пружины. Рабочий объём нижнего пневмоцилиндра соединили газовой магистралью с рабочим объёмом матрицы. При окончании горения экзотермической смеси допрессовку продукта синтеза осуществили ползуном пресса.

Перед началом инициирования процесса горения рабочий объём плунжера вакуумировали. После инициирования реакции горения нижний шток начали перемещать со скоростью $v_B = 3,5$ мм/с при скорости горения шихты $v_T = 6,3$ мм/с.

Соотношение скоростей $\frac{v_B}{v_T} \approx 0,56$, составило величину скорости перемещения

нижнего пуансона входит в диапазон скоростей, указанных в формуле изобретения.

Время горения брикета составил $\square 35$ с. За это время нижний пуансон уменьшил высоту шихтовой заготовки на 23%.

В момент окончания горения нижний пуансон остановили и надёжно зафиксировали. Затем начали перемещать верхний пуансон вниз со скоростью 5 м/с, при этом на верхнем пуансоне давление составило не более 0,5 МПа.

После того, как давление, деформирующее синтетический продукт, превысило указанное давление, включают прессовое оборудование, которое доуплотняет изделие.

Скорости перемещения пуансонов изменяли в диапазонах $0,5 \div 0,95$ скоростей относительно скорости горения шихтовых материалов. При выходе из указанных диапазонов давления $0,05 \div 1,0$ МПа изделия получают некачественные с расслоёнными трещинами и макропорами.

Физико-механические свойства образцов, вырезанных из изделия: плотность $4,38$ г/см³; предел прочности на сжатие $350 \div 370$ кгс/мм²; предел прочности на изгиб $60 \div 70$ кгс/мм²; твёрдость $86 \div 87$ HRA.

В таблице 3 приведены примеры получения изделий из порошковых материалов заявленным способом для граничных и промежуточных значений параметров.

Таблица 3

Примеры получения изделий из экзотермической шихтовой заготовки заявленным способом для граничных и промежуточных значений параметров.

№ п/п	Состав шихты, %	1 стадия деформирования Давление, МПа	2 стадия деформирования Давление, МПа	Физико-механические свойства изделий				
				плотность, г/см ³	прочность, $\sigma_{из}$, кгс/мм ²	прочность, $\sigma_{сж}$, кгс/мм ²	твёрдость, HRA	ударная вязкость, кгс·м/см ²
1	Ti – 56; Ni – 20; Mo – 10; B – 14.	1,0	50	4,38	60÷70	350÷370	86÷87	0,15
		0,5	150					
		0,1	300					
		0,05	400					
2	Карбо-нитрид титана TiCN – 74; Ni – 19,5; Mo – 6,5.	1,0	50	6,18	170÷180		90÷92,5	0,15
		0,5	150					
		0,1	300					

Совершенствование метода СВС-баротермии обеспечивает повышение качества изделий: исключается образование расслоев, микротрещин и пор, а также повышается плотность.

Отмеченные в таблицах 1-3 исходные химические реагенты, участвующие в качестве примеров в создании синтетических материалов сгруппированы и представлены в таблице 4, где:

1. Непрерывные твёрдые растворы *.
2. Ограниченные твёрдые растворы *.
3. Соединение *.
4. Эвтектические смеси *.
5. Не взаимодействуют (могут быть

введены при СВС в состав связки).

6. Материалы, которые могут быть синтезированы в режиме СВС-баротермии.

7. Материалы, синтезированные в режиме СВС-баротермии.

8-9. Материалы для спецтехники, которые могут быть синтезированы в режиме СВС-баротермии или синтезированные и находящиеся в стадии идентификации свойств.

Материалы, обозначенные [6-8] могут быть покрытиями как для сталей, чугунов, сплавов, цветных металлов, керметов, так и для металлов, входящих в состав покрытия.

Таблица 4

Сводные таблицы возможных вариантов химических соединений для получения синтетических материалов методом СВС-баротермии

22. Титан (Ti)	2-8-10-2 [Ar] 3d ² 4s ²	24. Хром (Cr)	2-8-13-1 [Ar] 3d ⁵ 4s ¹	28. Никель (Ni)	2-8-16-2 [Ar] 3d ⁸ 4s ²
<p>1. Sc(β), Zr(α, β), Hf(α, β), V(β), Nb(β), Ta(β), Cr(β), Mo(β), γ-U(β)</p> <p>2. Be, Mg, Ca, Sc(α), Y, La, V(α), Nb(α), Ta(α), Cr(α), Mo(α), W, U(α'), Mg, Re, Fe, Ru, Ir, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, B, Al, Ga, In, C, Si, Ge, Sn, Pb, N, Bi, O, H.</p> <p>3. Be, Cr, U, Mn, Tc, Re, Fe, Ru, Os, Ca, Ir, <u>Ni</u>, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Na, B, Al, Ga, In, <u>C, Si, Ge</u>, Sn, Pb, <u>N, P</u>, As, Sb, Bi, O, S, Se, Te, H</p> <p>4. Th</p> <p>[6]. Ti_xB₄</p> <p>[7]. Ti₃P, TiH₂</p> <p>[7.1]. TiC, TiC_x, TiN, TiH_x, TiB, TiB₂, TiAl, TiP,</p> <p>[7.2]. Твёрдые растворы TiC- (Cr₃C₂, Mo₂C, WC, WC-Mo₂C).</p> <p>[7.3]. Твёрдый раствор азота в титане TiN_x (x = 0,08÷0,32)</p> <p>[7.4]. Однофазные твёрдые растворы диборидов титана TiB₂-(CrB₂, MoB₂);</p> <p>[7.5]. Cr, NiTi</p> <p>9. TiAl, TiS₂, TiBi₂</p>	<p>1. βTi, V, Mo, W, αFe.</p> <p>2. Be, Y, La, <u>αTi</u>, Zr, Nb, Ta, U, Mn, Re, γFe, Ru, Os, Ca, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, Zn, B, Al, Si, <u>N, H</u></p> <p>3. <u>Be, Ti</u>, Zr, Hf, Ta, Nb, Tc, Mn, Re, Fe, Ru, Os, Ca, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt, Au, Zn, B, <u>Al, C</u>, Ge, <u>Si, N, P, As, Sb, O, S, Se, Te, H</u>,</p> <p>4. Th.</p> <p>5. Cd, Hg, Sn, Pb, Bi.</p> <p>6. Cr₂₃C₆, Cr_xN_y.</p> <p>[6.1]. См. эвтектику Cr_xTi_yC_z</p> <p>9. CrB₆, CrB₂, CrSi₂, Cr₂S₃, CrAl, CrBe₁₂</p>	<p>1. Mn(γ), Fe(γ), Co, Rh, Rd, Pt, Cu, Au.</p> <p>2. Be, Mg, Y, Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, U, Mn(), Tc, Re, Fe(α, β), Ru, Os, Zn, Cd, B, Al, Ga, In, C, Si, Ge, Sn, As, Sb, O, H.</p> <p>3. Be, Mg, Ca, Sc, Y, La, Ti, Zr, Hf, Th, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, U, Mn, Fe, Co, Pt, Cu, Zn, Cd, Hg, B, Al, Fa, In, C, Si, Ge, Sn, N, P, As, Sb, Bi, O, Se, Te, H.</p> <p>5. Li, Da, Ag, Tl, Pb.</p> <p>6. Ni_xP_y</p> <p>7. NiTi, NiAl.</p> <p>9. NiAl₃</p>			
42. Молибден (Mo)	2-8-18-12-1 [Kr] 4d ⁵ 5s ¹	6. Углерод (C)	2-4 1s ² 2s ² 2p ²	5. Бор (B)	2-3 2s ² 2s ¹
<p>1. βTi, V, Nb, Ta, Cr, W.</p> <p>2. Be, αTi, Zr, Hf, U, Mn, Tc, Re, Fe, Ru, Si, Os, Co, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt, Au, B, Al, C.</p> <p>3. <u>Be</u>, Zr, Hf, Mn, Tc, Re, Fe, Ru, Os, Co, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt, <u>B, Al, C, Si</u>, Ge, N, P, As, O, S, Se, Te.</p> <p>5. Mg, Cu, Ag, Zn, Hg, H.</p> <p>[6]. См. эвтектику Mo_xC_yTi_z,</p> <p>7. MoAl₂, MoS₂, MoSe₂, MoS₂-NbSe₂, MoSC₂-NbSe₂, MoSi₂</p> <p>9. MoB₄, Mo₂S₃, MoAl₇, MoBe₂</p>		<p>7. Соединения, синтезированные из многокомпонентных реагентов (Ti, Zr, Nb, Ta) + (Bg)) + C; Ti+(Mo, Re, Cr, Sc)+(B, C).</p>		<p>2. Y, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, W, Fe, Co, Ni, Cu, Al, Si, C.</p> <p>3. Li, Na, Mg, Be, Ca, Sr, Ba, Sc, Y, La, Ti, Zr, Hf, Th, V, Nb, Ta, Cr, Mo, Pu, W, U, Mn, Re, Fe, Ru, Os, Co, Rh, Ni, Pd, Pt, Cu, Al, <u>C, Si, N, P</u>, O, S, Se, H</p> <p>4. Ga</p> <p>5. Cd, Hg, In, Ge, Tl, Sn, Pb, Bi</p> <p>7. BuC, BN, см. «C»</p> <p>9. γ-BN(ρ1,8), BP, B₃Si</p>	

* Гипотетически возможные в СВС. Неисследованные синтезы, а отмеченные снизу подчёркиванием, исследованы и приведены по п. 6-9.

Выводы

1. Разработано инновационное устройство стартового уплотнения продуктов горения для получения методом СВС-баротермии тугоплавких, труднодеформируемых материалов и изделий на их основе.

2. Показано, что стартовое уплотнение продукта синтеза повышает физико-механические свойства синтетических заготовок с возможностью регулировки их пористости.

3. Разработанный способ стартового уплотнения синтетической заготовки позволяет утилизировать спутные газы, образующиеся в результате СВС-процессов в вакуумные ёмкости, что исключает выбрасывание их в атмосферу.

4. Подобраны варианты соединений исходных химических элементов – реагентов для получения целевого продукта методом СВС-баротермии.

Библиографический список

1. Вайцехович С.М., Мишулин А.А. Исследование процессов уплотнения продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и разработка оборудования для его силового компактирования. // Кузнечно-штамповочное производство, 1993, №7, С. 5-8.
2. Вайцехович С. М. Теория и технология получения изделий методами СВС-баротермии на основе моделирования процессов

накопления повреждений / С. М. Вайцехович, В. М. Михалевич, В. А. Краевский // Порошковая металлургия. – №1/2, 2013. – С. 3–10. – ISSN 0032-4795.

3. Пат. 2 566 101 Российская Федерация. МПК В22F 3/23 (2006.01) Устройство для прессования экзотермической шихтовой заготовки. / Вайцехович С.М, Кужель А.С., Степанов Л.С. и др. – заявитель и патентообладатель Вайцехович С.М., Кужель А.С. (RU), заявка №2014126662/02 от 02.07.2014, опубл. 20.10.2015 Бюл. №29.
4. Вайцехович С.М., Власов Ю.В. Систематизация продуктов СВС-баротермии // Литейное производство, 2022, №12, С. 2-4.
5. Вайцехович С.М. Иницирование реакции горения в технологиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / С.М Вайцехович, Д.В. Панов, Г.Г. Кривенко / Технология машиностроения, Москва, ISSN: 1562-322X. 2018, №4. С 5-16.
6. Пат. № 2 577 641 Российской Федерации МПК⁷ В22F 3/14, С01В31/30; В01J19/08. Устройство для иницирования реакции термосинтеза и получения компактной заготовки. / Вайцехович С.М., Степанов Л.С., Кужель А.С. и др. (Россия) – заявитель и патентообладатель Вайцехович С.М. (RU), заявка № 2014 126 661 (043237) от 02.07.2014, опубл. 20.03.2016, Бюл. № 8.

Information about the paper in English

S.M. Vaitsekhovich, Yu.V. Vlasov
JSC Afanasev Scientific Production Association Tekhnomash
Moscow, Russia
E-mail: ask-mlad@mail.ru
Receipt date: November 01, 2022

IMPROVING METALLURGICAL EQUIPMENT TO PRODUCE HIGH MELTING MATERIALS BY USING SHS BAROTHERMY METHODS

Abstract

The paper describes the suggested equipment for hot pressing of synthetic billets in the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) mode to carry out a process, combining force and temperature effect on synthetic products, resulting from the auto-wave process of burning of solid fine powders, liquids and gases known as SHS barothermy.

Keywords: SHS barothermy, die, starting compaction



УДК 621.793

В.А. Кукареко, А.Н. Григорчик
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: GrigorchikAN@gmail.com
Дата поступления 04.11.2022

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ДЮРОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ «СТАЛЬ 70 + АК12», ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Аннотация

Исследовано структурно-фазовое состояние и дюрометрические свойства композиционных газотермических покрытий «Сталь 70 + АК12», полученных методом высокоскоростной металлизации. Показано, что в результате напыления формируется плотное покрытие с пористостью около 5 об. % и пониженным содержанием оксидов. Фазовый состав напыленного покрытия включает в себя: α -Fe, Al, γ -Fe, Si, FeO, Fe₃O₄, Al₂O₃. Твердость и микротвердость покрытия составляет 230 HV 10 и 380 HV 0,025, соответственно. Отжиг покрытия «Сталь 70 + АК12» при температуре 550°C в течение 2-10 часов приводит к выделению в нем до 35 об. % интерметаллидных соединений (Al₅Fe₂, Al₁₃Fe₄, AlFe, Fe₃Al₂Si₃), а также увеличению твердости покрытия примерно в 1,7 раза и возрастанию его пористости до 15-25 об. %. Показано, что выдержка покрытий при отжиге более 6 часов приводит к снижению его дюрометрических свойств, что связано с коагуляцией интерметаллидных соединений и дополнительным возрастанием пористости.

Ключевые слова: композиционное покрытие, высокоскоростная металлизация, структура, непопешности, фазовый состав, твердость и микротвердость.

Введение

Метод высокоскоростного газотермического напыления позволяет эффективно формировать экономичные защитные и износостойкие покрытия из проволоочных токопроводящих материалов на поверхностях изделий [1, 2]. Кроме этого, методом высокоскоростной металлизации возможно распыление одного проволоочного материала или двух разнородных сплавов [3]. В свою очередь, одновременное распыление двух проволоочных материалов позволяет формировать уникальные покрытия из псевдосплавов различных систем [3-5], например, Fe-Al, Ni-Al, Cu-Al, Mg-Zn, Cu-Zn, Ti-Al и т.д. Ввиду простоты метода газотермического напыления и доступности используемых для распыления проволоочных материалов, формируемые композиционные покрытия имеют относительно низкую стоимость по сравнению с аналогичными по-

крытиями, полученными методами порошковой металлургии, сваркой взрывом, литьем или пропиткой [6-7]. Помимо этого, для повышения свойств напыленных композиционных покрытий целесообразно проводить их дополнительную термическую обработку, приводящую к выделению в них интерметаллидных соединений, обладающих широким комплексом уникальных свойств [7, 8]. Вместе с тем, в литературе отсутствуют систематизированные данные о влиянии термической обработки на структурно-фазовое состояние и свойства, полученных методом высокоскоростной металлизации композиционных газотермических покрытий, являющихся перспективными материалами для узлов трения, работающих в условиях высоких контактных давлений и агрессивных сред. В связи с этим, целью данной работы являлось исследование влияния отжига на структурно-фазовое состояние и дюрометрические свойства газо-

термического покрытия из композиционного материала системы «Fe-Al», полученного совместным распылением проволок из стали 70 и алюминиевого сплава АК12.

Основная часть

Получение образцов и методики исследований. В качестве объектов исследований были выбраны газотермические покрытия, полученные совместным напылением стальной проволоки из стали 70 и алюминиевого сплава АК12. Напыление проводилось на предварительно подготовленную поверхность подложки из стали 35 методом высокоскоростной металлизации, с использованием разработанной в ОИМ НАН Беларуси установки АДМ-10 [9]. Химический состав напыленного покрытия из композиционного материала «Сталь 70 + АК12» представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав газотермического покрытия из «Сталь 70 + АК12»

Массовое содержание элемента, масс. %								
Al	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu	Fe
21,24	2,64	0,13	0,03	0,03	0,43	0,07	0,04	Остальное

Исследования структурно-фазового состояния покрытий проводилось после напыления (исходное состояние), а также после термической обработки, заключающейся в нагреве образцов покрытий до температуры 550°C, с последующей выдерж-

кой продолжительностью 2, 4, 6, 8, 10 часов. Температура и время выдержки образцов выбиралось на основании ранее проведенных исследований [10].

Металлографические исследования газотермических покрытий проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Исследование фазового состояния газотермических покрытий, проводилось на дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном кобальтовом (CoK_{α}) излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялось при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2. Определение объемного содержания интерметаллидной фазы в покрытиях после отжига выполнялось с помощью программного обеспечения Almaz. Измерения твердости и микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор $P = 10$ кг и 25 г, соответственно.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате высокоскоростного газотермического напыления проволочных материалов (сталь 70 и алюминиевый сплав АК12) формируется плотное покрытие, включающее перемежающиеся стальные и алюминиевые прослойки, разделенные оксидными слоями, расположенными на поверхностях напыленных частиц (рисунок 1, а). Пористость напыленных покрытий не превышала ≈ 5 об. %.

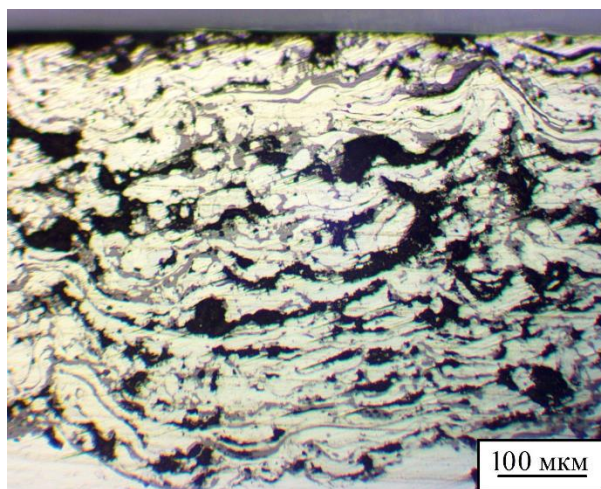
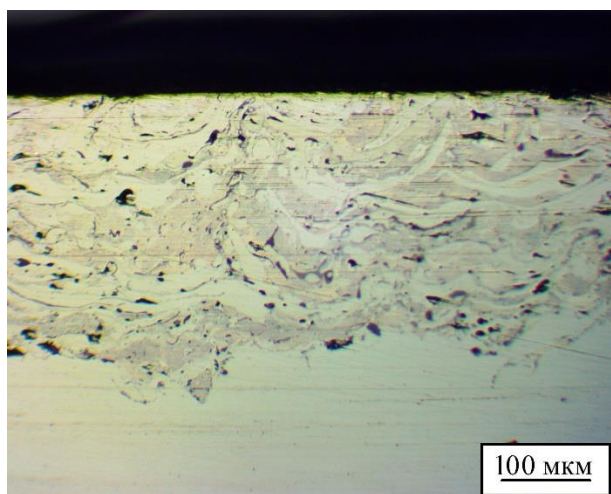


Рисунок 1. Характерные микроструктуры газотермических покрытий из «Сталь 70 + АК12» в исходном состоянии (а) и после отжига при температуре 550°C в течение 10 часов (б)

Фазовый состав напыленного покрытия «Сталь 70 + АК12» включает в себя α -Fe, Al, γ -Fe, Si, FeO, Fe₃O₄, Al₂O₃ (таблица 2, рисунок 2, а). Необходимо отметить, что напыленное композиционное покрытие содержит пониженное количество оксидов железа FeO, Fe₃O₄ по сравнению с напыленными стальными покрытиями [9-11]. Низкое содержание оксидов железа в напыленных покрытиях связано с предотвращением окисления частиц железа за счет их обволакивания легкоплавким алюминием в процессе металлизации, а также с восстановлением оксидов железа алюминием [12]. При этом образование тонкой и плотной пленки оксида Al₂O₃ на поверхности расплавленных алюминиевых и железных частиц защищает их от окисления.

Отжиг напыленного покрытия «Сталь 70 + АК12» при температуре 550°C с выдержкой в течение 2, 4, 6, 8 и 10 часов приводит к существенным изменениям его структурно-фазового состояния. В частности, в покрытиях в результате отжига выделяются интерметаллидные фазы Al₅Fe₂, Al₁₃Fe₄, AlFe, Fe₃Al₂Si₃, а также полностью исчезает чистый алюминий (таблица 2). Отсутствие чистого алюминия после отжига в покрытиях объясняется его растворением в стальных частицах, а также диффузионным

переносом железа в алюминиевые прослойки с образованием интерметаллидных соединений. Размер выделяющихся частиц интерметаллидного соединения Al₅Fe₂, а также объемное содержание интерметаллидных фаз в отожженных покрытиях представлены на рисунке 3. Также необходимо отметить, что в результате отжига покрытий регистрируется увеличение значений параметров кристаллических решеток матричных α -Fe и γ -Fe фаз (таблица 2), что свидетельствует о диффузионном переносе атомов алюминия, имеющего большой атомный радиус, в стальные частицы с образованием твердого раствора алюминия в железе. Кроме этого, в покрытиях, подвергнутых отжигу, регистрируется пониженное содержание аустенитной фазы \approx 3-4 об. % по сравнению с его содержанием в исходном состоянии (таблица 2). Это также связано с легированием в процессе отжига стальных частиц алюминием, что в свою очередь, приводит к существенному расширению области существования α -Fe [13]. Снижение количества остаточного аустенита также регистрировалось при напылении алюминий содержащих композиционных покрытий из «06X19H9Т + АД1» и «95X18 + АД1» [14, 15].

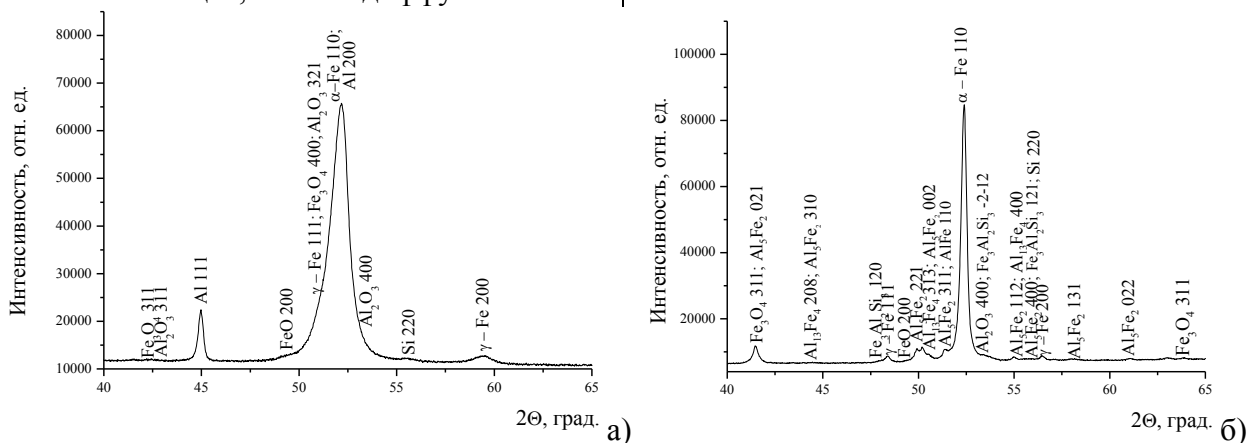
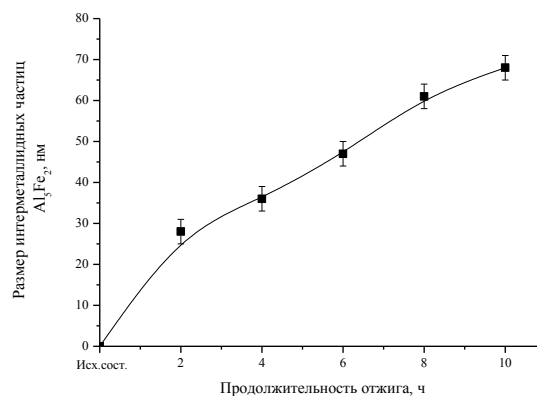
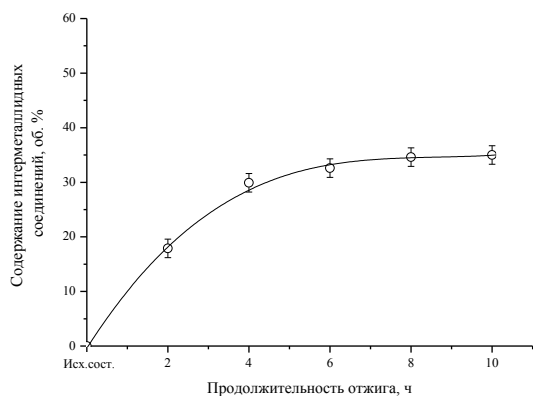


Рисунок 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α) от поверхностных слоев газотермических покрытий «Сталь 70 + АК12» в исходном состоянии (а) и после отжига при температуре 550°C в течение 10 часов (б)



а) б)

Рисунок 3. Содержание интерметаллидных соединений (а) и размер выделившихся частиц интерметаллидной фазы Al_5Fe_2 (б) в покрытиях «Сталь 70 + АК12» в результате его отжига при температуре $550^\circ C$ и времени выдержки от 2 до 10 часов

Таблица 2

Фазовый состав, содержание аустенита и параметры кристаллических решеток матричных фаз покрытия

Режим отжига	Фазовый состав	Содержание аустенита в стальных частицах V_γ , об. %	Параметр кристал. решетки (a), нм	
			α -Fe	γ -Fe
Исходное состояние	α -Fe, Al, γ -Fe, Si, FeO, Fe_3O_4 , Al_2O_3	7,7	0,2865	0,3610
T = $550^\circ C$, 2 часа	α -Fe, Al_5Fe_2 , $Al_{13}Fe_4$, AlFe, $Fe_3Al_2Si_3$, γ -Fe, Si, FeO, Fe_3O_4 , Al_2O_3	3,0	0,2867	0,3684
T = $550^\circ C$, 4 часа		4,1	0,2867	0,3686
T = $550^\circ C$, 6 часов		3,9	0,2867	0,3683
T = $550^\circ C$, 8 часов		3,9	0,2868	0,3682
T = $550^\circ C$, 10 часов		3,8	0,2868	0,3681

Из данных, представленных на рисунке 3 можно видеть, что максимальное содержание интерметаллидных соединений в покрытиях из «Сталь 70 + АК12», отожженных при температуре $550^\circ C$, достигается в результате выдержки в течение 4-6 часов. При этом размер частиц основной выделившейся интерметаллидной фазы

Al_5Fe_2 составляет 35-45 нм. Более длительная выдержка композиционного покрытия при отжиге в течение 8-10 часов приводит к коагуляции интерметаллидных частиц и незначительному увеличению их содержания (рисунок 3).

Диффузионный перенос атомов алюминия в стальные прослойки сопровождается формированием повышенной пористости покрытий (рисунок 4). Это связано с тем что, при отжиге при температуре 550⁰С диффузионная подвижность атомов легкоплавкого алюминия достаточно высока по сравнению с диффузионной подвижностью атомов железа, что приводит к преимущественному переносу атомов алюминия в железные прослойки. При этом обеспечивающие диффузию вакансии концентрируются в алюминиевых прослойках и конденсируясь на дефектах кристаллической решетки и межслойных границах формируют вакансионные поры [16, 17].

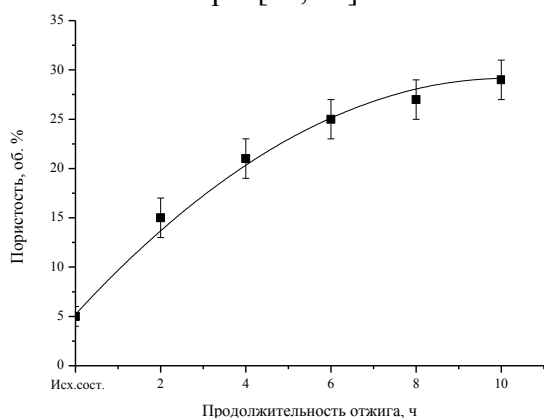


Рисунок 4. Зависимость пористости газотермических покрытий из «Сталь 70 + АК12» от времени их выдержки при температуре 550⁰С

Изменение твердости и микротвердости газотермических покрытий «Сталь 70 + АК12» в зависимости от времени выдержки при отжиге при температуре 550⁰С представлены на рисунке 5. Газотермическое покрытие «Сталь 70 + АК12» после напыления имеет твердость 230 HV 10, а его микротвердость составляет 380 HV 0,025 (рисунок 5). Отжиг покрытия при температуре 550⁰С в течение 2-6 часов приводит к максимальному возрастанию его твердости и микротвердости. В частности, твердость достигает значений 250-270 HV 10, а микротвердость – 620-640 HV 0,025 (рисунок 5). Возрастание дюрометрических свойств композиционного покрытия связано с выделением в нем большого количества интерметаллидных соединений (рисунок 3, а), характеризующихся высокими прочностными свойствами [18]. Существенное различие между значениями твердости и микротвердости обусловлено повышенной пористостью покрытий, оказывающей существенное влияние на дюрометрические свойства при высоких нагрузках измерений. Снижение микротвердости покрытий, отожженных при температуре 550⁰С в течение 8-10 часов, связано с коагуляцией интерметаллидных соединений.

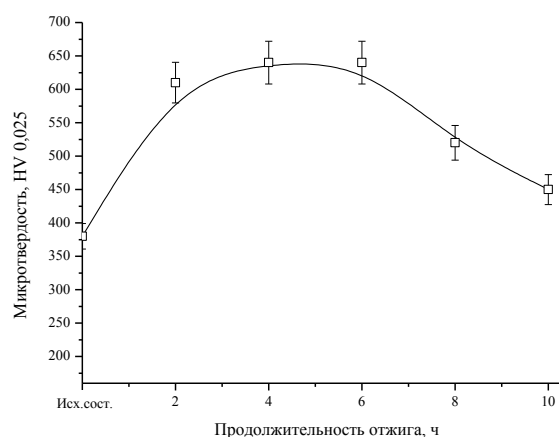
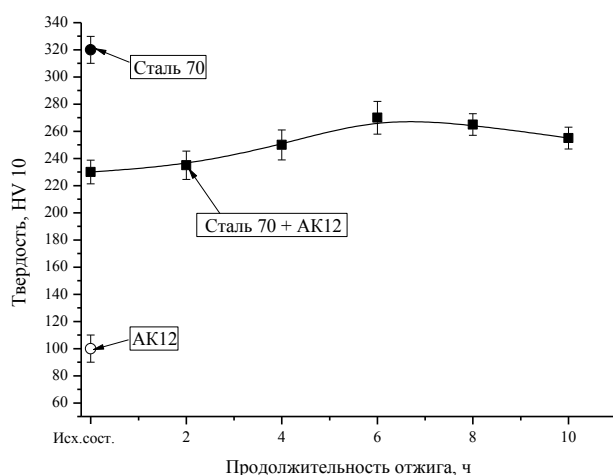


Рисунок 5. Зависимости твердости (а) и микротвердости (б) от времени выдержки газотермического покрытия «Сталь 70 + АК12» при отжиге при температуре 550⁰С

Таким образом, можно сделать вывод, что способ высокоскоростной металлизации позволяет эффективно формировать экономичные покрытия из композиционных материалов. Последующий отжиг покрытий «Сталь 70 + АК12» приводит к выделению в них упрочняющих интерметаллидных соединений и возрастанию дюрометрических свойств, а также к повышению их пористости, что в свою очередь может позволить формировать поверхностные слои пар трения с высокими антифрикционными и смазкоудерживающими свойствами.

Заключение

Исследовано структурно-фазовое состояние и дюрометрические свойства композиционных газотермических покрытий «Сталь 70 + АК12», полученных высокоскоростной металлизации. Установлено, что в результате напыления формируется плотное покрытие с пониженным содержанием оксидов железа. Фазовый состав напыленного покрытия включает в себя: α -Fe, Al, γ -Fe, Si, а также оксиды FeO, Fe₃O₄, Al₂O₃. Твердость и микротвердость покрытия составляют 230 HV 10 и 380 HV 0,025, соответственно. Установлено, что в результате отжига композиционного покрытия «Сталь 70 + АК12» при температуре 550⁰С в течение 2-10 часов в нем происходит выделение интерметаллидных частиц Al₅Fe₂, Al₁₃Fe₄, AlFe, Fe₃Al₂Si₃ (до 35 об. %), а также сохраняются матричные фазы α -Fe и γ -Fe. Чистый алюминий в результате отжига полностью исчезает за счет его диффузии в стальные прослойки, а также за счет диффузионного переноса атомов железа в алюминиевые прослойки с образованием интерметаллидных частиц. Растворение алюминия в стальных прослойках приводит к повышению пористости покрытий до 15-27 об. %. Показано, что в результате отжига покрытий при температуре 550⁰С в течение 2-6 часов регистрируется максимальное значение микротвердости покрытия, составляющее 620-640 HV 0,025. Сделан вывод, что способ газотермического напыления позволяет формировать эконо-

мичные покрытия из композиционных материалов, термическая обработка которых приводит к возрастанию их дюрометрических свойств за счет выделения интерметаллидных соединений.

Библиографический список

1. Упрочнение газотермических покрытий: монография / Витязь П. А., Азизов Р. О., Белоцерковский М.А. Минск: Бест-принт, 2004. 192 с.
2. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / Белоцерковский М. А. Минск: УП «Технопринт», 2004. 200 с.
3. Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства псевдосплавов, напыленных из высокохромистых сталей и цветных металлов / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т.15. №8. С. 355-359.
4. Сложные металлизационные псевдосплавы как подшипниковые материалы / Красниченко Л.В., Смолянинов А.И., Подкович Е.Г. и др. // Применение новых материалов в сельскохозяйственном машиностроении: Сборник статей. Ростов-на-Дону, 1966. С. 3–20.
5. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Сапожникова А.Б. Композиционные материалы в технике. Киев: Технпса, 1985. 152 с.
6. Rawers J.C. Tensile fracture iron – iron aluminide foil composites // Scripta Materialia. 1994. Vol. 30, № 6. P. 701-706.
7. Synthesis of Bulk FeAl Nanostructured Materials by HVOF Spray Forming and Spark Plasma Sintering / T. Grosdidier, F. Bernard, E. Gaffet and etc. // Intermetallics. 2006. Vol. 14. №. 10/11. P. 1208-1213.
8. Wille C.G., Tala'at Al-Kassab, Kirchheim R. Time evolution of morphology in mechanically alloyed Fe–Cu // Ultramicroscopy. 2011. № 6. P. 730–737.
9. Белоцерковский М.А. Прядко А.С. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий про-

- волочными материалами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. №12. С. 17 – 23.
10. Влияние термической обработки на структуру, фазовый состав и износостойкость газотермических покрытий из псевдосплава «08Г2С+АК12» / Е.В. Астрашаб, А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко и др. // Трение и износ. 2020. Т.41. №1. С.12-18.
 11. Влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства экономичных газотермических покрытий из проволочных сталей различных классов / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.В. Белый и др. // Трение и износ. 2013. Т. 34. № 6. С. 621–627.
 12. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и износостойкость газотермических покрытий из железо-алюминиевых псевдо-сплавов / Кукареко В.А., Белоцерковский М.А., Григорчик А.Н. и др. // Актуальные вопросы машиноведения: сборник трудов. Минск, 2019. С. 294-298.
 13. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 480 с.
 14. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В.А. Кукареко, А.Н. Григорчик, М.А. Белоцерковский и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т.13. №7. С. 318-322.
 15. Структурно-фазовое состояние и триботехнические характеристики газотермических покрытий из проволочных сталей различных классов / Белоцерковский М.А., Григорчик А.Н., Кукареко В.А. // Актуальные вопросы машиноведения: сборник статей. Минск, 2012. С. 398–400.
 16. Зайт В. Диффузия в металлах. М.: Издательство иностранной литературы, 1958. 381 с.
 17. Рост и залечивание пор в монокристаллах жаропрочных сплавов на никелевой основе / Б. Бокштейн, А. Епишин, И. Светлов и др. // Функциональные материалы. 2007. Т. 1. №5. С. 162-169.
 18. Исследование структуры и свойств плазменных покрытий на основе Fe-Al / И.А. Селиверстов, Г.Н. Троцан, И.В. Смирнов и др. // Научный вестник Херсонской государственной морской академии. 2014. №1. С. 249-254.

Information about the paper in English

V.A. Kukareko, A.N. Grigorichik

The Joint Institute of Mechanical Engineering
of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, the Republic of Belarus
E-mail: GrigorichikAN@gmail.com
Receipt date: November 04, 2022

EFFECT OF ANNEALING ON THE STRUCTURAL PHASE STATE AND DUROMETRIC PROPERTIES OF
“STEEL 70 + AK12” COMPOSITE COATINGS PRODUCED BY HIGH-SPEED METALLIZATION

Abstract

The paper contains studies on the structural phase state and durometric properties of “steel 70 + AK12” composite gas-thermal coatings produced by high-speed metallization. It was demonstrated that the spraying resulted in a dense coating with a reduced content of oxides. The phase composition of the sprayed coating includes α -Fe, Al, γ -Fe, Si, FeO, Fe₃O₄, and Al₂O₃. Coating hardness and microhardness is 230 HV 10 and 380 HV 0.025, respectively. Annealing of “steel 70 + AK12” coating at 550 °C for 2-10 hours entails the precipitation of intermetallic compounds (Al₅Fe₂, Al₁₃Fe₄, AlFe, Fe₃Al₂Si₃) and an increase in hardness by 1.7 times and porosity. It is shown that soaking of coatings during annealing for over 6 hours results in lower durometric properties attributed to the coagulation of intermetallic compounds and an additional increase in porosity.

Keywords: composite coating, high-speed metallization, structure, discontinuities, phase composition, hardness and microhardness.



УДК 62-822

М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов
ООО «Уральский инжиниринговый центр»
г. Челябинск, Россия
E-mail: goido@cheltec.ru
Дата поступления 09.11.2022

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО АККУМУЛЯТОРА ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РАБОТЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА

Аннотация

Рассмотрен способ сохранения части потенциальной энергии упругих деформаций, накопленной к концу рабочего хода пресса в его металлоконструкциях и в рабочей жидкости, путем соединения полостей рабочих гидроцилиндров с жидкостной полостью пневмогидравлического аккумулятора. С использованием безразмерных параметров определены условия, при выполнении которых обеспечивается максимальное приращение энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе после соединения его жидкостной полости с полостями рабочих гидроцилиндров подвижной траверсы пресса по окончании рабочего хода.

Ключевые слова: гидравлический пресс; пневмогидравлический аккумулятор; сохранение энергии упругих деформаций.

Введение

Во время рабочего хода подвижной траверсы гидравлического пресса из-за упругих деформаций нагружаемых металлоконструкций пресса и сжимаемости рабочей жидкости в рабочих гидроцилиндрах и трубопроводах, в указанных компонентах пресса накапливается значительная потенциальная энергия \mathcal{E}_1 [1, 2]. Существуют различные предложения по сохранению энергии \mathcal{E}_1 и ее использованию для выполнения полезной работы и тем самым снижения потерь энергии при работе пресса: применением маховика [2], путем специфического исполнения пресса [3], посредством гидропреобразователя, работающего как мультипликатор давления с автоматически изменяемым коэффициентом преобразования [4], с помощью пневмогидравлического аккумулятора [5]. С точки зрения простоты реализации и минимизации материальных затрат наиболее рациональным представляется техническое решение, основанное на применении пневмогидравлического аккумулятора.

Энергия, сохраненная путем соединения полостей рабочих гидроцилиндров по

окончании рабочего хода пресса с жидкостной полостью пневмогидравлического аккумулятора, в последующем может использоваться для повышения давления в соответствующих гидроцилиндрах на начальном этапе, например, рабочего хода подвижной траверсы пресса и выполнения таких вспомогательных операций как перемещение стола, выталкивателя или прошивня (при наличии упомянутых устройств в составе пресса). Эта энергия может также использоваться для управления клапанами наполнения, гидрораспределителями с электрогидравлическим управлением, регулируемые насосами с пропорциональным электрическим управлением и другими устройствами с гидроуправлением, входящими в состав гидросистемы пресса.

Однако на текущий момент отсутствуют какие-либо рекомендации относительно выбора параметров пневмогидравлического аккумулятора (его номинальной вместимости, давления зарядки газом, давления в аккумуляторе в момент соединения его жидкостной полости с полостями рабочих гидроцилиндров пресса) для рассматриваемого случая его применения. Данная статья в определенной степени должна восполнить указанный пробел.

Целью настоящей работы является определение условий, при выполнении которых, обеспечивается максимальное приращение энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе после соединения его жидкостной полости с полостями рабочих гидроцилиндров подвижной траверсы прессы по окончании рабочего хода.

Основная часть

При изменении давления в полостях рабочих гидроцилиндров на величину $\Delta p_{гц}$ объем $\Delta V_{упр}$ рабочей жидкости, необходимой для компенсации упругих деформаций соответствующих металлоконструкций прессы и сжимаемости жидкости, содержащейся в полостях указанных гидроцилиндров и примыкающих к ним гидролиниях, в первом приближении составляет:

$$\Delta V_{упр} = k_{упр.пр} \Delta p_{гц}, \quad (1)$$

где $k_{упр.пр}$ — приведенный коэффициент упругости, учитывающий сжимаемость рабочей жидкости, содержащейся в полостях рабочих гидроцилиндров и примыкающих к ним гидролиниях, а также упругие деформации металлоконструкций прессы, связанные с изменениями давления в полостях рабочих гидроцилиндров.

При проведении последующих математических выкладок будем считать:

коэффициент $k_{упр.пр}$ постоянной величиной;

процесс изменения давления газа в пневмогидравлическом аккумуляторе политропным с постоянным показателем политропы n ;

в один и тот же момент времени значения давления в жидкостной и газовой полостях пневмогидравлического аккумулятора одинаковыми;

все значения давления, измеренными по абсолютной шкале.

После соединения полостей рабочих гидроцилиндров прессы при давлении в них, равном $p_{раб}$, и жидкостной полости пневмогидравлического аккумулятора при давлении в ней, равном $p_{нач}$ ($p_{нач} < p_{раб}$), и окончания переходного процесса, связанного с их соединением, давление жидкости

в этих полостях выравнивается и приобретает значение $p_{кон}$, которое может быть найдено из следующего уравнения:

$$k_{упр.пр} (p_{раб} - p_{кон}) = V_{а.ном} p_{зар}^{\frac{1}{n}} \left(p_{нач}^{\frac{1}{n}} - p_{кон}^{\frac{1}{n}} \right), \quad (2)$$

где $V_{а.ном}$ — номинальная вместимость пневмогидравлического аккумулятора; $p_{зар}$ — давление зарядки пневмогидравлического аккумулятора газом.

Физически давление $p_{нач}$ не может быть меньше значения $p_{зар}$, то есть $p_{нач} \geq p_{зар}$. Таким образом, с учетом обоих приведенных выше неравенств:

$$p_{зар} \leq p_{нач} < p_{раб}. \quad (3)$$

Энергия $\Delta \mathcal{E}_{а.п}$, накапливаемая в пневмогидравлическом аккумуляторе при политропном процессе изменения давления газа в нем от значения $p_{нач}$ до значения $p_{кон}$, определяется с помощью выражения [6]:

$$\Delta \mathcal{E}_{а.п} = V_{а.ном} p_{зар}^{\frac{1}{n}} (p_{кон}^{1-\frac{1}{n}} - p_{нач}^{1-\frac{1}{n}}) / (n-1). \quad (4)$$

При переходе к безразмерным параметрам:

$$B = V_{а.ном} / (k_{упр.пр} p_{раб});$$

$$\Delta \bar{\mathcal{E}}_{а.п} = \Delta \mathcal{E}_{а.п} / (p_{раб} V_{а.ном});$$

$$\bar{p}_{зар} = p_{зар} / p_{раб};$$

$$\bar{p}_{нач} = p_{нач} / p_{раб};$$

$$\bar{p}_{кон} = p_{кон} / p_{раб};$$

система уравнений (2), (4) приобретает вид:

$$B \bar{p}_{зар}^{\frac{1}{n}} (\bar{p}_{нач}^{-\frac{1}{n}} - \bar{p}_{кон}^{-\frac{1}{n}}) + \bar{p}_{кон} - 1 = 0, \quad (5)$$

$$\Delta \bar{\mathcal{E}}_{а.п} = \bar{p}_{зар}^{\frac{1}{n}} (\bar{p}_{кон}^{1-\frac{1}{n}} - \bar{p}_{нач}^{1-\frac{1}{n}}) / (n-1). \quad (6)$$

В соответствии с уравнением (6) имеем:

$$\bar{p}_{кон} = \left[(n-1) \bar{p}_{зар}^{\frac{1}{n}} \Delta \bar{\mathcal{E}}_{а.п} + \bar{p}_{нач}^{1-\frac{1}{n}} \right]^{n/(n-1)}. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) уравнение (5) представляет собой уравнение относительно величины $\Delta \bar{\mathcal{E}}_{а.п}$ при фиксированных безразмерных параметрах B , $\bar{p}_{зар}$, $\bar{p}_{нач}$ и n .

Размерное значение приращения энергии $\Delta\mathcal{E}_{a.п}$ связано с безразмерными величинами $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п}$ и B следующим образом:

$$\Delta\mathcal{E}_{a.п} = \Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п} B k_{упр.пр} p_{раб}^2 = 2\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п} B \mathcal{E}_{упр}, \quad (8)$$

где $\mathcal{E}_{упр} = k_{упр.пр} p_{раб}^2 / 2$ — потенциальная энергия упругих деформаций напряженных металлоконструкций прессы, находящихся под высоким давлением жидкости и стенок каналов, в которые она заключена.

В соответствии с выражением (8) при прочих равных условиях значение $\Delta\mathcal{E}_{a.п}$ тем больше, чем больше произведение $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п} B$. Очевидно, что при фиксированных значениях B , $k_{упр.пр}$ и $p_{раб}$ значение $\Delta\mathcal{E}_{a.п}$ тем больше, чем больше $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п}$. Поэтому, с использованием уравнения (5), с учетом выражения (7) и неравенства (3) численными методами решалась задача определения значения $\bar{p}_{нач.э}$, которому при фиксированных значениях B , $\bar{p}_{зар}$ и n соответствует максимальное значение $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э}$.

Расчеты проводились при варьировании параметров B , $\bar{p}_{зар}$ и n в следующих диапазонах, представляющих интерес с практической точки зрения: $B \in [0, 25; 5]$, $\bar{p}_{зар} \in [0, 1; 0, 55]$, $n \in [1, 1; 1, 4]$.

Согласно полученным результатам при прочих равных условиях произведение $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э} B$ увеличивается с увеличением безразмерного параметра B (рисунок 1) и, соответственно, с увеличением номинальной вместимости $V_{a.ном}$ пневмогидравлического аккумулятора $[B = V_{a.ном} / (k_{упр.пр} p_{раб})]$.

На графике зависимости $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э} B$ от B (см. рисунок 1) можно выделить два характерных участка. На первом участке, который соответствует значениям параметра B , меньшим некоторого граничного значения $B_{гр}$, незначительные изменения параметра B в сторону его увеличения приводят к ощутимому увеличению произведения $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э} B$. На втором участке, соответ-

ствующим значениям параметра B , большим величины $B_{гр}$, увеличение параметра B сопровождается незначительным увеличением произведения $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э} B$. Другими словами, упомянутым участкам зависимости $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э} B$ от B соответствуют существенно отличающиеся в среднем по абсолютной величине значения производной $\partial(\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э} B) / \partial B$. В силу отмеченного обстоятельства увеличение параметра B сверх значения $B_{гр}$ является малоэффективным с точки зрения увеличения сохраняемой энергии $\Delta\mathcal{E}_{a.п}$ поскольку влечет за собой при прочих равных условиях необходимость более существенного увеличения номинальной вместимости $V_{a.ном}$ пневмогидравлического аккумулятора.

Зависимость произведения $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э} B$ от безразмерного давления зарядки $\bar{p}_{зар}$ имеет экстремум (максимум), который становится менее ярко выраженным с увеличением безразмерного параметра B (рисунок 2). При этом, чем больше значение параметра B , тем больше максимальное значение функции $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э} B$ от $\bar{p}_{зар}$ и тем больше значение $\bar{p}_{зар}$, при котором экстремум данной функции при прочих равных условиях имеет место (см. рисунок 2).

При прочих равных условиях меньшим значениям n соответствуют повышенные значения произведения $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э} B$ (рисунок 3). В целом же значение показателя политропы n в диапазоне его изменения от 1,1 до 1,4 оказывает незначительное влияние на произведение $\Delta\bar{\mathcal{E}}_{a.п.э} B$, особенно при $B \geq 2$ (см. рисунок 3).

При фиксированном значении безразмерного параметра B при некотором граничном значении $\bar{p}_{зар.гр}$ безразмерного давления зарядки $\bar{p}_{зар}$ значение безразмерного давления $\bar{p}_{нач.э}$ оказывается равным $\bar{p}_{зар}$. При значениях $\bar{p}_{зар} > \bar{p}_{зар.гр}$ без учета неравенства (3) решение рассматриваемой задачи оптимизации приводит к значениям $\bar{p}_{нач.э} < \bar{p}_{зар}$, что физически невозможно.

В связи с этим при $\bar{p}_{зар} > \bar{p}_{зар.гр}$ с учетом неравенства (3) принималось: $\bar{p}_{нач.э} = \bar{p}_{зар}$. Следует отметить, что чем больше значение $\bar{p}_{зар}$, тем при большем значении безразмерного параметра B значение $\bar{p}_{нач.э}$ становится больше $\bar{p}_{зар}$ (см. рисунки 1, 2).

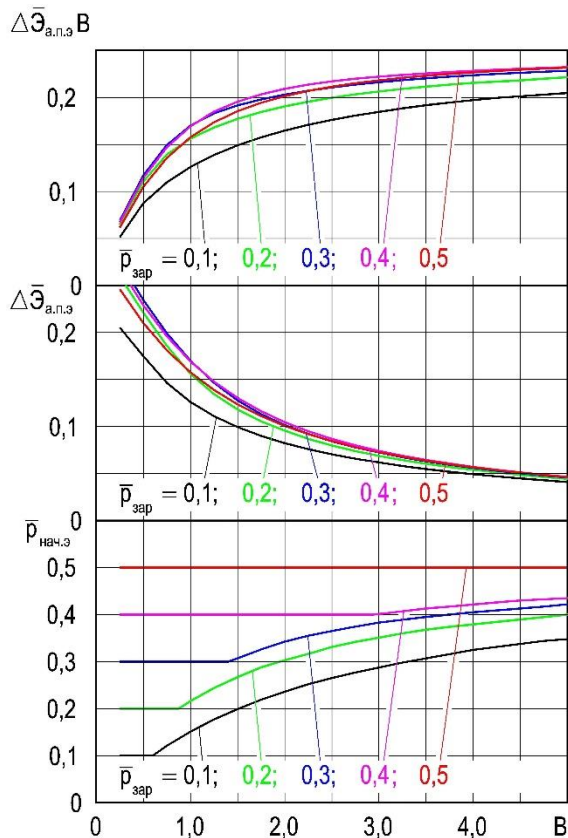


Рисунок 1. Графики зависимости $\bar{p}_{нач.э}$, $\Delta \bar{E}_{а.п.э}$ и $\Delta \bar{E}_{а.п.э} B$ от безразмерного параметра B при $n=1,3$ и ряде значений безразмерного давления $\bar{p}_{зар}$

При $\bar{p}_{нач.э} = \bar{p}_{зар}$ выражение (7) для $\bar{p}_{кон}$ приобретает вид:

$$\bar{p}_{кон} = \bar{p}_{зар}^{-1/(n-1)} \left[(n-1) \Delta \bar{E}_{а.п.э} + \bar{p}_{зар} \right]^{n/(n-1)}. \quad (8)$$

В результате подстановки выражения (8) в уравнение (5) получаем:

$$B \left\{ 1 - \bar{p}_{зар}^{-1/(n-1)} \left[(n-1) \Delta \bar{E}_{а.п.э} + \bar{p}_{зар} \right]^{-1/(n-1)} \right\} + \bar{p}_{зар}^{-1/(n-1)} \left[(n-1) \Delta \bar{E}_{а.п.э} + \bar{p}_{зар} \right]^{n/(n-1)} - 1 = 0, \quad (9)$$

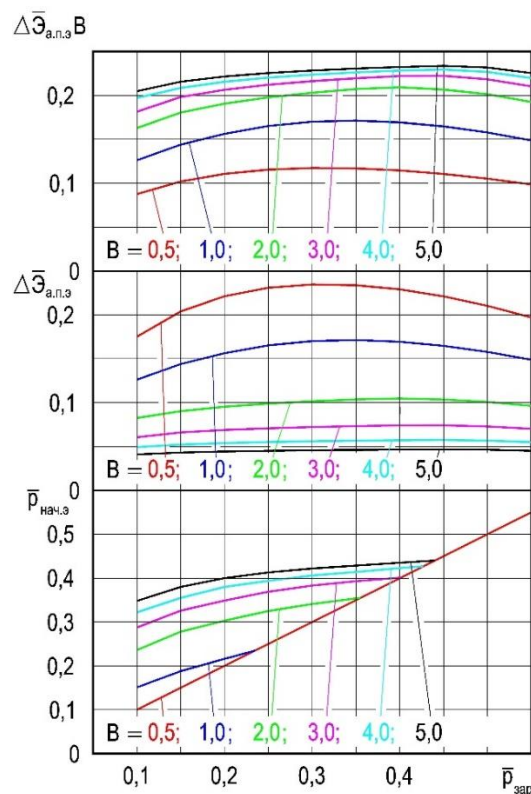


Рисунок 2. Графики зависимости $\bar{p}_{нач.э}$, $\Delta \bar{E}_{а.п.э}$ и $\Delta \bar{E}_{а.п.э} B$ от безразмерного давления $\bar{p}_{зар}$ при $n=1,3$ и ряде значений безразмерного параметра B

В рассматриваемом случае значение $\Delta \bar{E}_{а.п.э}$ определяется просто как решение уравнения (9).

В соответствии с полученными результатами в первом приближении можно считать: $B_{гр} \approx 2,0$. При $B=2,0$ и $n=1,3$ максимальное значение $\Delta \bar{E}_{а.п.э} B$ имеет место при условии, что $\bar{p}_{зар} = 0,4$ и $\bar{p}_{нач.э} = \bar{p}_{зар} = 0,4$, и составляет $\Delta \bar{E}_{а.п.э} B = 0,209$ (см. рис. 1, 2), а $\bar{p}_{кон} = 0,555$.

Поскольку при разгрузке рабочих полостей рабочих гидроцилиндров пресса от давления желательно сохранить как можно больше энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе для ее последующего использования, то расходовать жидкость из аккумулятора следует вплоть до понижения давления в аккумуляторе до значения $P_{нач.э} = \bar{p}_{нач.э} P_{раб}$.

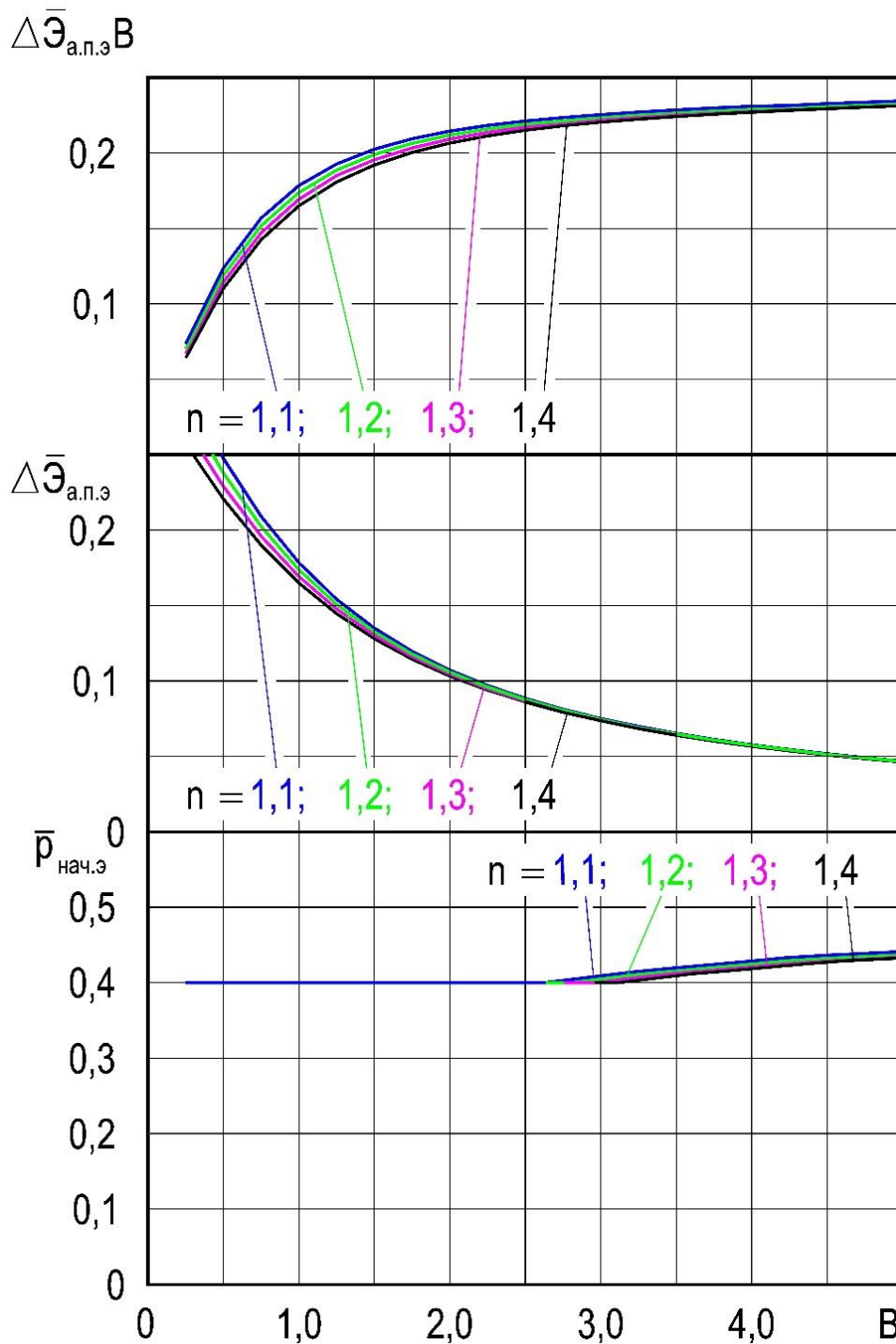


Рисунок 3. Графики зависимости $\bar{p}_{нач.\varepsilon}$, $\Delta \bar{\mathcal{E}}_{a.p.\varepsilon}$ и $\Delta \bar{\mathcal{E}}_{a.p.\varepsilon} B$ от безразмерного параметра B при $\bar{p}_{зар} = 0,4$ и ряде значений показателя политропы n

Следует отметить, что при использовании энергии, сохраненной в пневмогидравлическом аккумуляторе, для управления клапанами наполнения, гидрораспределителями с электрогидравлическим управлением, регулируемые насосы с пропорциональным электрическим управлением и другими устройствами с гидроуправлением, входящими в состав гидросистемы

пресса, значение давления $p_{нач.\varepsilon} = \bar{p}_{нач.\varepsilon} p_{раб}$ должно быть достаточным для решения задач управления и, соответственно, значение $\bar{p}_{зар}$ должно выбираться с учетом требования к минимально допустимому значению давления $p_{нач.доп}$, необходимому для указанного управления.

Заключение

В соответствии с вышеизложенным при выборе параметров пневмогидравлического аккумулятора, используемого для сохранения энергии упругих деформаций, накопленной в металлоконструкциях и рабочей жидкости к концу рабочего хода пресса, можно рекомендовать следующие значения безразмерных параметров:

$$B = V_{a.ном} / k_{упр.пр} p_{раб} = 2, 0;$$

$$\bar{p}_{зар} = p_{зар} / p_{раб} = 0, 4.$$

Рекомендуемое значение $\bar{p}_{зар}$ должно быть увеличено, если существует ограничение на минимально допустимое значение $p_{нач}$ и при $\bar{p}_{зар} = 0, 4$ это ограничение не выполняется, то есть $p_{нач.э}$ ($p_{нач.э} = \bar{p}_{нач.э} p_{раб}$) получилось меньше $p_{нач.доп}$.

Поскольку при разгрузке полостей рабочих гидроцилиндров пресса от давления желательно сохранить как можно больше энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе для ее последующего использования, то расходовать жидкость из аккумулятора следует вплоть до понижения давления в аккумуляторе до значения $p_{нач.э} = \bar{p}_{нач.э} p_{раб}$.

Библиографический список

1. Добринский Н.С. Гидравлический привод прессов. М.: Машиностроение, 1975. 222 с.
2. Гидравлические прессы. Некоторые конструкции и расчеты / Под ред. Б.П. Васильева. М.: Машиностроение, 1966. 436 с.
3. А. с. 461778 СССР. МПК В21J9/12. Гидравлический пресс / Л.Л. Роганов. № 1793097/25-27; заявл. 02.06.1972; опубл. 28.02.1975.
4. Пат. 2515779 Российская Федерация. МПК В30В15/24 В30В1/34. Гидравлический привод подвижной траверсы пресса / М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов; заявитель и патентообладатель В.В. Бодров. № 2013106309/02; заявл. 13.02.2013; опубл. 20.05.2014.
5. Пат. 2078640 Российская Федерация. МПК В21J9/12 В30В15/16. Гидравлический привод пресса / М.Е. Гойдо, В.В. Бодров, Р.М. Багаутдинов; заявитель и патентообладатель Челябинский государственный технический университет. № 95113523/02; заявл. 08.08.1995; опубл. 10.05.1997.
6. Гойдо М.Е. Проектирование объемных гидроприводов (Б-ка конструктора). М.: Машиностроение, 2009. 304 с.

Information about the paper in English

M.E. Goido, V.V. Bodrov, R.M. Bagautdinov
LLC Ural Engineering Center, Chelyabinsk, Russia
E-mail: goido@cheltec.ru
Receipt date: November 09, 2022

USING A HYDROPNEUMATIC ACCUMULATOR TO SAVE ELASTIC STRAIN ENERGY IN THE OPERATION OF HYDRAULIC PRESSES

Abstract

The paper describes a method of saving a share of potential elastic strain energy accumulated by the end of working strokes of the press in its steel structures and actuation fluid by connecting chambers of operating hydraulic cylinders with a fluid chamber of a hydropneumatic accumulator. By using non-dimensional parameters, the authors have identified conditions of ensuring maximum energy gain in the hydropneumatic accumulator, when its fluid chamber is connected with chambers of operating hydraulic cylinders of a press frame cross-head upon completion of working strokes.

Keywords: hydraulic press, hydropneumatic accumulator, saving elastic strain energy.



УДК 531.43/46

Д. В. Туманов, А.Л. Кузьминов
ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет»
г. Череповец, Россия
E-mail: alkuzminov@chsu.ru
Дата поступления 09.12.2022

РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРА С ГИДРОПОДЖИМОМ ДЛЯ УСТАНОВКИ И ЗАМЕНЫ ЗАЩИТНОЙ ТРУБЫ НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Аннотация

В работе описаны конструктивные решения и особенности применения в промышленных условиях сталеплавильного производства Череповецкого металлургического комбината ПАО «Северсталь» манипулятора с гидроподжимом для установки и замены защитной трубы в технологической системе «сталеразливочный ковш-промежуточный ковш» установки непрерывной разливки стали. Особенностью конструкции разработанного манипулятора является то, что он прижимает защитную трубу к коллектору шибера затвора стальной ковша и может сопровождать ковш при его движении в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Аргон для дополнительной защиты стыка защитной трубы и шибера подводится к коллектору шибера затвора стальной ковша по отдельной трубе или по конструкции манипулятора. Это обеспечивает защиту струи жидкого металла способом, исключающим насыщение, стали азотом, кислородом и другими газами из атмосферы и создает условия для повышения качества металла и уменьшения брака непрерывнолитых заготовок.

Ключевые слова: установка непрерывной разливки стали (УНРС), непрерывно-литая заготовка, манипулятор, защитная труба, шибера затвор, сталеразливочный ковш, промежуточный ковш, аргон, гидроподжим.

Введение

Разливка стали на установке непрерывной разливки стали (УНРС) является высокопроизводительным процессом и требует адаптации к быстро изменяющимся условиям производства. Тонкая настройка технологии непрерывной разливки возможна только при автоматизации и механизации большинства технологических операций получения непрерывно-литой заготовки, как, например, подача шлакообразующей смеси [1], микро- и макрохолодильников (иннокуляторов) в кристаллизатор [2], автоматизированное управление вторичным охлаждением [3].

До последнего времени, узким местом технологической системы «сталеразливочный ковш-промежуточный ковш-кристаллизатор» являлась эффективная защита струи жидкого металла способом, исключа-

ющим насыщение, стали азотом, кислородом и другими газами из атмосферы. Как следствие, это ведет к неизбежному ухудшению качества слитка. Достаточно давно применяемая на большинстве УНРС система подачи жидкого металла в промковш закрытой струей через защитную трубу [4], как правило, предусматривала ручное управление манипулятором, которое исключало эффективное сопровождение сталеразливочного ковша в процессе его перемещения на подъемно-поворотном стенде. Это вносило неизбежные ошибки в систему управления положением защитной трубы, обусловленные субъективными причинами и, соответственно, не позволяло, в полной мере, решить задачу исключения инъекции в струю жидкой стали газов из атмосферы.

Основная часть

Разработанный манипулятор с гидроподжимом показан на рисунке 1. Он предназначен для установки и замены защитной трубы во время разливки стали на установке непрерывной разливки стали (УНРС). Манипулятор прижимает защитную трубу к коллектору шиберного затвора стальной ковша и может сопровождать ковш при его движении в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Аргон подводится к коллектору шиберного затвора стальной ковша по отдельной трубе или, если позволяет конструкция защитной трубы, по конструкции манипулятора. Исполнение манипулятора позволяет развивать усилие прижима защитной трубы к коллектору шиберного затвора стальной ковша до 700 кгс.

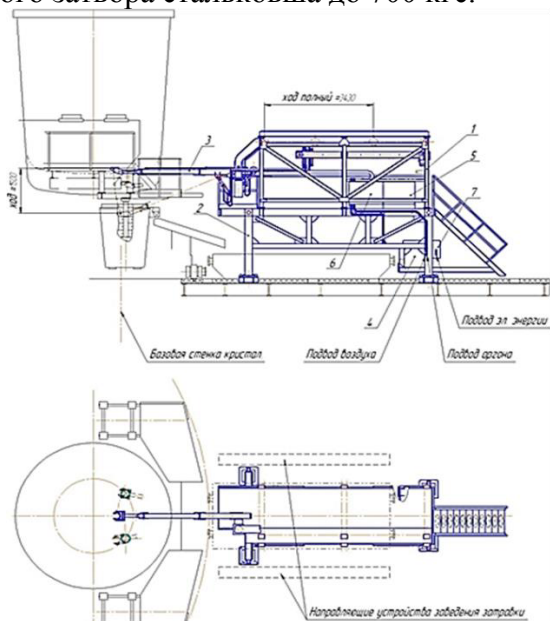


Рисунок 1. Манипулятор с гидроподжимом для установки и замены защитной трубы: 1- площадка верхняя; 2- площадка нижняя; 3-манипулятор; 4- гидростанция 5- шкаф управления; 6-шкаф регулирования и учета аргона; 7-соединительная коробка

Конфигурация аппаратов гидравлической станции, рисунок 2, обеспечивает создание необходимого усилия поджатия защитной трубы, поддержание его при подъеме (опускании) стальной ковша, при этом обеспечивается герметизация стыка с коллектором шиберного затвора.

Гидравлическая система включает цилиндр (1) поджатия защитной трубы, содержащий штоковую (1а) и поршневую (1б)

полости, соединенные с распределителем (2) и двумя дросселями (3), при этом цилиндр (1) через распределитель (2) подключен к сливной (Т) и напорной (Р) магистралям, с последней из которых соединен гидроаккумулятор (4). Также система включает реле давлений верхнего (5) и нижнего (6) значений давления в системе, распределитель разгрузки (7), предохранительный клапан (8).

Управляющий элемент (контроллер), получивший сигнал о критическом значении давления в гидравлической системе управляет распределителем (2) и распределителем разгрузки (7).

Нормальная работа гидравлической системы для обеспечения усилия поджатия стальной ковша, составляющего 450-700 кгс реализуется при давлении в системе 110-160 бар.

В случае, если давление в напорной линии цилиндра (1), например, при опускании стальной ковша, превысило допустимый уровень 160 бар, то поток рабочей жидкости сбрасывается на слив, за счет настроек перепускного предохранительного клапана (8).

Если давление в гидравлической системе понизилось ниже допустимого уровня разрядки аккумулятора (135 бар), то реле нижнего давления (6) подаст сигнал на катушку распределителя разгрузки (7) и давление в гидросистеме станет снова повышаться до значения настройки реле верхнего давления (5) (145 бар).

Пуск гидростанции производится с пульта управления манипулятора включением ключом-биркой. Далее, в течение всего процесса разливки, гидростанция остается включенной. При длительных остановках разливки ее выключают ключом-биркой.

Движение манипулятора по направляющим вперед-назад (1), см. рисунок 3 осуществляется при помощи мотор-редуктора и цепной передачи.

Угол наклона (2) стрелы манипулятора в вертикальной плоскости осуществляется при помощи гидроцилиндра.

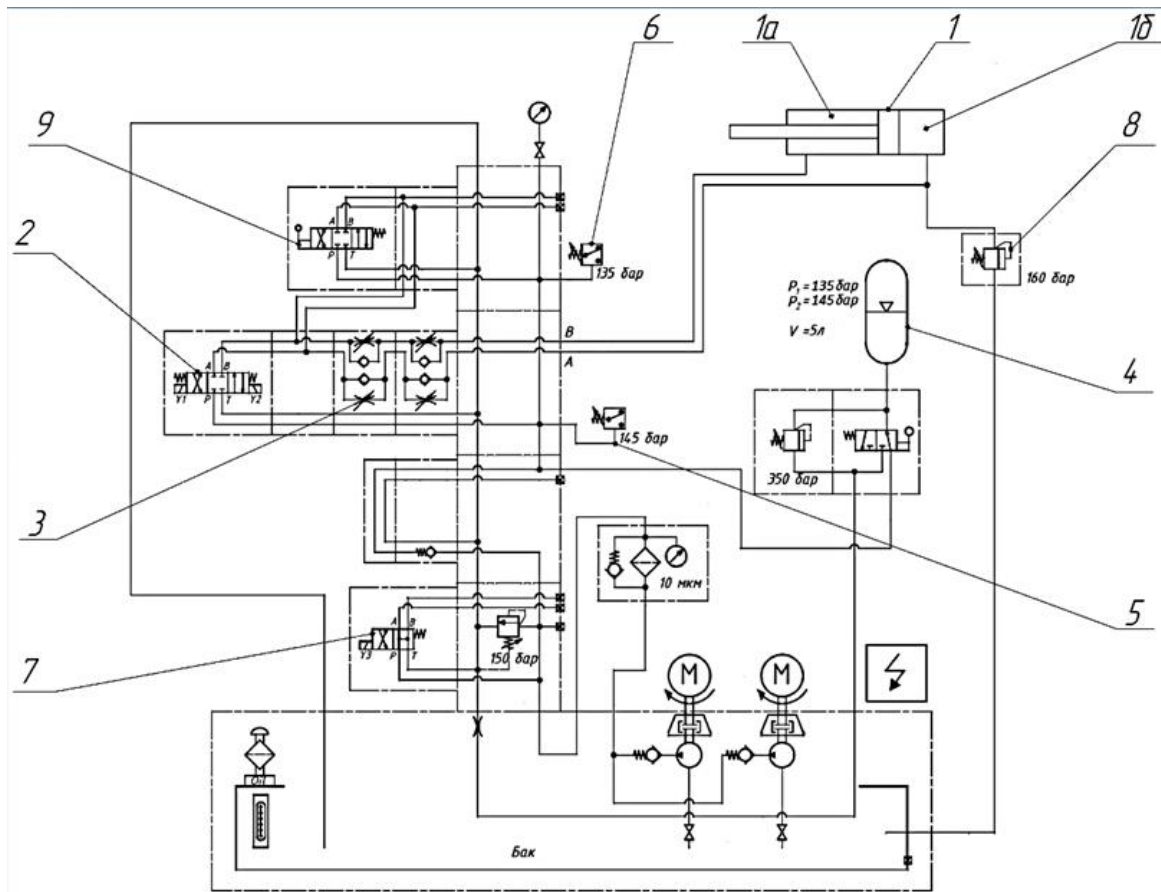


Рисунок 2. Гидравлическая система манипулятора

Поворот (3) стрелы манипулятора в горизонтальной плоскости осуществляется вручную за рукоятку.

Вращение (4) стрелы манипулятора вокруг своей оси осуществляется вручную, через редуктор.

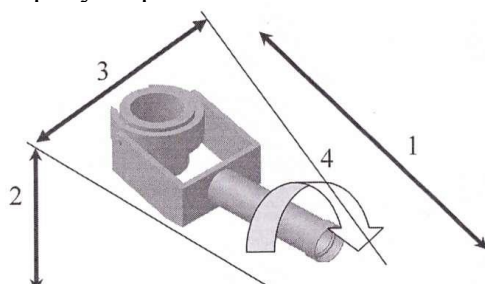


Рисунок 3. Схема движений манипулятора

Система управления обеспечивает ручное управление процессом установки и поджатия защитной трубы.

Перед началом процесса установки, защитная труба помещается в корзину манипулятора. Затем, манипулируя джойстиком и кнопками «Стакан поднять» - «Стакан опустить», расположенными на пульте управления манипулятором, оператор манипулятора перемещает защитную трубу

под шиберный затвор стальной трубы. Во время движения манипулятора включается световая и звуковая предупредительная сигнализация.

Отцентрировав трубу с коллектором шиберного затвора стальной трубы, оператор нажимает кнопку «Стакан поднять». Гидросистема манипулятора производит подъем защитной трубы. После поджатия защитной трубы к коллектору шиберного затвора дальнейшее поддержание усилия поджатия обеспечивается автоматически, за счет соответствующей настройки компонентов гидростанции.

Одновременно со стыковкой трубы, система управления формирует управляющие воздействия на запорно-регулирующую арматуру тракта подачи аргона на уплотнение стыковочного узла трубы. Заданный расход аргона поддерживается в автоматическом режиме. В процессе работы манипулятора система управления осуществляет контроль частотного преобразователя, гидростанции, расхода аргона.

Для замены отработавшей трубы манипулятор перемещают в исходное положение. Разворачивают корзину, пока труба не выпадет в мусорную емкость.

При аварийном отводе защитной трубы от шибера затвора (при отключении электроэнергии) управление наклоном стрелы манипулятора возможно от ручного клапана, расположенного на гидроблоке насосной станции. В гидроаккумуляторе сохраняется давление достаточное для 1-2-х подъемов – опусканий стрелы манипулятора.

Перемещение тележки манипулятора при этом возможно вручную.

В рамках данной работы был изменен выходной патрубок коллектора шибера стальковша с увеличенной площадью контакта защитной трубы и разработан коллектор аргонной защиты, рисунок 4. Оригина-

льной конструкцией предусмотрено равномерное распределение аргона на стык защитной трубы и коллектора шибера.

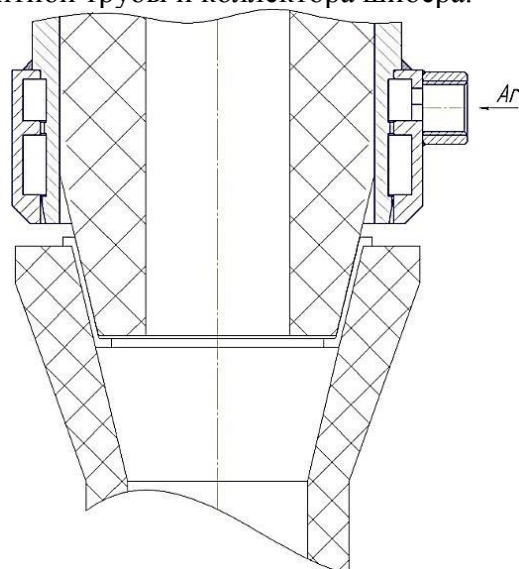


Рисунок 4. Конструкция выходного патрубка коллектора шибера стальковша



Рисунок 5. Внешний вид модернизированной защитной трубы

Кроме этого, были проведены работы по газовому уплотнению со стороны защитной трубы (рисунок 5). Выполнена доработка защитной трубы по организации подвода аргона на место стыка со стакан-коллектором. На внутреннем конусе трубы выполнена кольцевая проточка, к которой через герметичное штуцерное соединение организован подвод аргона. Для увеличения несущей нагрузки защитной трубы при ее

прижмем к коллектору шибера, на трубу дополнительно установлена защитная стальная обечайка.

Установка манипулятора в течение достаточно длительного времени в условиях цеха разливки конверторной стали сталеплавильного производства Череповецкого металлургического комбината ПАО «Северсталь» на установках непрерывной разливки стали (рисунок 6) позволила получить прирост аргона до 5 ppm на 70% плавков от 38% базовых.



Рисунок 6. Размещение манипулятора на разливочной площадке конвертерного цеха сталеплавильного производства ЧерМК ПАО «Северсталь»

Заключение

1. Разработана усовершенствованная по сравнению с аналогами конструкция манипулятора с гидроподжимом защитной трубы для подачи жидкого металла в промковш УНРС закрытой струей, снабженная следящим гидроприводом. Это обеспечивает сопровождение ковша при его движении в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Организован подвод аргона в зону стыка между шибером и защитной трубой.
2. Промышленное применение манипулятора в условиях конвертерного цеха сталеплавильного производства

ЧерМК ПАО «Северсталь» позволило снизить содержание азота и других газов, инжектируемых из атмосферного воздуха, и, тем самым, повысить качество разливаемых непрерывно-литых слитков.

Библиографический список

1. Туманов Д.В., Кузьминов А.Л. Методы и аппаратные устройства для ввода присадок в кристаллизатор // Научно-технический прогресс в черной металлургии: Матер. 1-й Междунар. науч.-техн. конф. – Череповец, 2013. – С. 357—363.
2. Туманов Д.В., Кузьминов А.Л., Виноградов В.П. Опытнo-промышленная реализация технологии и оборудования для подачи холодильников–иннокуляторов в кристаллизатор УНРС в условиях ПАО «Северсталь»/ Металлург. - №7. - 2016. - С. 41-46.
3. Кузьминов А.Л., Голубев А.В., Кожевников А.В. и др. Совершенствование системы охлаждения непрерывнолитой заготовки на основе реальной информации о тепловом состоянии слитка //Металлург. - 2009. -№4. - С. 41-44.
4. В.М. Нисковских и др. Машины непрерывного литья слябовых заготовок. - М.: Металлургия, 1991. - 272 с.

Information about the paper in English

D.V. Tumanov, A.L. Kuzminov
Cherepovets State University
Cherepovets, Russia
E-mail: alkuzminov@chsu.ru
Receipt date: December 09, 2022

DEVELOPMENT AND INDUSTRIAL USE OF THE HYDRAULIC HOLD-DOWN MANIPULATOR TO INSTALL AND CHANGE THE SHROUD AT THE CONTINUOUS CASTING MACHINE

Abstract

The paper describes design solutions and features of the industrial use of the hydraulic hold-down manipulator to install and change the shroud in the process flow system: the ladle – the tundish of the continuous casting machine at the steelmaking division of the Cherepovets Steel Mill (PJSC Severstal). The design of the developed manipulator is characterized by holding down the shroud to the collector of the slide gate of the ladle and accompanying the ladle in vertical and horizontal travels. Argon used to additionally protect the connection point of the shroud and the slide gate is supplied to the collector of the slide gate of the ladle by an individual pipe or the structure of the manipulator. This protects the liquid steel jet by excluding the pickup of nitrogen, oxygen and other ambient gases and creates conditions for the better quality of steel and reduced amount of rejected concast billets.

Keywords: continuous casting machine (CCM), concast billet, manipulator, shroud, slide gate, ladle, tundish, argon, hydraulic hold-down.



УДК 621.793.74: 303.447.3

Г.И. Трифонов
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
г. Воронеж, Россия
E-mail: trifonov_gi@mail.ru
Дата поступления 09.12.2022

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация

В работе показана возможность применения математического планирования эксперимента при исследовании пористости покрытий, полученных при применении технологии плазменного напыления. Экспериментально получены уравнения регрессии, позволяющие регулировать основные свойства наносимых покрытий в зависимости от режимов процесса напыления. По итогу проведенного планирования получены адекватные и рабочие уравнения зависимости пористости покрытия, во-первых, от силы тока и гранулометрического состава напыляемого функционального порошка, во-вторых, от дистанции и угла напыления. Составлены и представлены графики полученных зависимостей.

Ключевые слова: плазменное напыление, покрытие, пористость, сила тока, дистанция и угол напыления, гранулометрический состав порошка, регрессионный анализ, многофакторный эксперимент.

Введение

Известно, что на ремонтно-восстановительных производствах весьма активно эксплуатируется в производственных целях специальное оборудование [1]. В ходе активной эксплуатации происходит интенсивный износ рабочих агрегатов и механизмов, при этом поверхности деталей могут достигать такого состояния, при котором будет необходимо их восстанавливать путем использования специальных технологий, например, таких как плазменное напыление, лазерное упрочнение, нанесение гальванических покрытий и т.д. Следовательно, проведение капитального ремонта производственного оборудования предопределяется конкретным периодом времени его эксплуатации, причем проведение ремонтных работ с экономической точки зрения вопроса обосновано возможностью использования до 30 % деталей без значительных дефектов и до 60 % деталей, которые после оценки эксперта можно восстановить. Так, исследуя современные производственные линии и статистические данные заводских предприятий,

был сделан вывод о том, что затраты на деталь, которая не требует ремонта, составляют до 10 % от стоимости новой (запасной) детали [2]. При этом основываясь на экономической обоснованности проведения восстановительных операций, затраты могут составлять до 70 % от стоимости новой (запасной) детали. Необходимо отметить, что вторичная эксплуатация деталей после их восстановления позволяет значительно экономить производственные средства и ресурсы.

В России в рамках программы импортозамещения уделяется большое внимание проблемам восстановления и ремонта машин и специального оборудования. При восстановительных операциях уделяется повышенное внимание таким характеристикам деталей и машин, как долговечность и надежность. Технологии восстановления развиваются на основе передовой отечественной науки и техники. Одной из самых экономически выгодных и универсальных технологий, направленных

на восстановление и упрочнение изношенных поверхностей деталей машин, является плазменное напыление [3].

Функциональные покрытия, нанесенные с помощью технологии плазменного напыления, обладают значительной пористостью, что оказывает существенное влияние их на физико-механические и эксплуатационные свойства [3-5]. Следовательно, возможность регулирования указанного параметра с помощью вариации величин технологических режимов имеет важное практическое значение. Однако, на процесс формирования покрытий оказывает большое существенное число факторов, что создает сложность получения зависимостей между пористостью и режимами процесса напыления [6].

В данной работе для установления закономерностей влияния таких режимов напыления как сила тока, дистанция и угол напыления, а также такой параметр наносимого материала как гранулометрический состав порошка, на пористость формируемого покрытия использовалось математическое планирование экспериментов. Поскольку многофакторные системы с применением регрессионного анализа позволяют существенно сократить число опытов, получить количественную оценку влияния каждого режимного параметра исследуемого процесса на пористость покрытия, а также оценить точность полученных результатов и ослабить влияние случайных ошибок.

Цель исследования. Исследование физико-механического параметра покрытия, такого как пористость, в зависимости от назначаемых технологических параметров: силы тока, дистанции и угла напыления, а также от параметра материала напыления – гранулометрического состава функционального порошка. Проведение экспериментальных исследований и регрессионного анализа влияния указанных технологических режимов и параметров на пористость формируемого покрытия.

Материалы исследования

Проводимые экспериментальные исследования проводилось с использованием порошка окиси алюминия, наносимого на

подложку образцов, изготовленных по ГОСТ 103-2006 толщиной 20 мм и шириной 75 мм из стали 12Х18Н10Т. При этом напыление производилось с помощью плазмотрона ПНК-50 с межэлектродной вставкой, входящего в комплект установки УПУ-3Д.

Пористость покрытий определялась методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139 (СТ СЭВ 891), сущность которого заключается в сравнении масс одинаковых объемов испытуемого вещества и жидкости известной плотности [7, 8]. Взвешивание проводили на аналитических весах ВЛА-200 (АДВ-200М).

Обработка экспериментальных данных по определению пористости нанесенного материала, описывающих и оценивающих процесс нанесения покрытий плазменным напылением, производится с помощью методов статистической обработки [9]. При этом использовалось планирование многофакторного эксперимента, поскольку многофакторный план эксперимента позволяет получить уравнения с независимыми оценками всех коэффициентов, входящих в уравнение и определяющих оптимальные условия необходимого нам процесса, что и является конечным результатом проводимых исследований [10].

При подборе оптимальных технологических режимов и материала для плазменного напыления целесообразно выяснить, какое воздействие оказывают на физико-механические и эксплуатационные свойства получаемого покрытия следующие технологические режимы: сила тока дуги плазмотрона, дистанция и угол наклона плазмотрона при осуществлении напыления, а также фракционный состав материала напыления. При проведении данных исследований сила тока изменялась в пределах 300-400 (А); дистанция напыления в пределах 100-150 (мм), угол напыления в пределах 70-90 (град), и гранулометрический состав наносимого порошка в пределах 60-100 (мкм). Остальные параметры данного процесса во всех опытах поддерживались постоянными [6]: напряжение дуги – $U=60-62$ (В); расход плазмообразующих газов – $g_1=1,8-2$ ($m^3/ч$); соотношение газов в смеси – 75 % N_2

+ 25 % Ar; расход транспортирующего газа – $g_2=0,2$ (м³/ч); расход порошка – $G=1$ (кг/ч).

В данном случае необходимо проанализировать влияние сразу нескольких факторов на один, который может существенным образом повлиять на физико-механические свойства покрытия. С данной целью используем планирование многофакторного эксперимента. В ходе проведения регрессионного анализа будут реализованы простые двухуровневые планы. Такие модели описывают достаточно верно изучаемый процесс только в указанных диапазонах изменения факторов. А за пределами диапазонов линейные уравнения будут неверно определять характер поверхности отклика. Поэтому для более точного описания исследу-

емого процесса дополнительно будет использоваться план второго порядка – более сложный план. План второго порядка позволяет получить модели в виде полного квадратного уравнения (полинома второй степени) и определить оптимальные условия функционирования процесса на заключительном этапе исследования [9-11].

На первом этапе для сокращения числа опытов были отобраны те факторы, которые оказывают наибольшее влияние на пористость плазменных покрытий и устанавливаются на требуемом уровне с заданной точностью. В таблице 1 представлены натурные и кодированные значения выбранных факторов, а также определены уровни и интервалы варьирования.

Таблица 1

Уровни факторов и интервалы варьирования

Варьируемые факторы	Обозначение фактора		Интервал варьир.	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень
	натуральн.	кодированн.				
Дистанция напыления	L , мм	X_1	25	-1	0	+1
Ток дуги	I , А	X_2	50	300	350	400
Гранул. состав порошка	Q , мкм	X_3	20	60	80	100
Угол напыления	α , град.	X_4	10	70	80	90

Таблица 2

Результаты опытов двухфакторного (дистанция и угол напыления) эксперимента

Номер опыта	Y_1	Y_2	Y_3
1	15,8	17,1	17,2
2	15,6	13,9	14,9
3	15,1	16,6	16,2
4	13,7	12,6	14
5	14,6	15,6	16,1

Необходимо отметить, что пределы изменения переменных факторов ограничивали возможностью применяемого оборудования, физико-химическими свойствами используемых материалов, и выбирали из соображений оптимальности ведения процесса.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование влияния дистанции и угла напыления на пористость. Рассмотрим план полного факторного эксперимента ПФЭ 2ⁿ, конкретнее ПФЭ 2², так как факторов у нас будет два – это угол наклона плазмотрона и дистанция напыления. Центр эксперимента соответствует нуле-

вому уровню (основной уровень), следующие уровни определяются с помощью интервалов варьирования. Опыты первой части плана проводились при сочетании величин исследуемых факторов на двух уровнях: верхнем (+1) и нижнем (-1). В таблице 2 представлены результаты опытов двухфакторного (дистанция и угол напыления) эксперимента типа $N=2^2$. Экспериментальные значения открытой пористости, полученные в каждом параллельном опыте (таблица 2), обозначены y_1, y_2, y_3 .

Перед построением регрессионного уравнения необходимо проанализировать данные эксперимента с помощью критерия Кохрена [12], то есть оценить дисперсию результатов наблюдений (ошибок наблюдений). Рассчитанный критерий Кохрена

(0,29) сравниваем с выбранным значением из таблицы для уровня значимости $\alpha=0,05$ с числом степеней свободы 2 и количеством наблюдений 4. Табличный критерий Кохрена (0,7679) больше рассчитанного, следовательно, процесс и опыты воспроизводимы. Иначе говоря, результаты наблюдений независимы, подчинены нормальному закону распределения, имеют одну и ту же дисперсию, и математические ожидания значений (отклика выходной переменной) будут равны истинным значениям целевой функции. Уравнение регрессии, адекватно описывающее экспериментальные данные и удовлетворительно характеризующее внутреннюю область изучаемого факторного пространства

$$p_1 = 15,58 - 0,48L - 1,13\alpha. \quad (1)$$

Полученное уравнение регрессии (1) адекватно описывает экспериментальные данные, так как расчетное значение критерия Фишера $F_{рас} = 2,974$ меньше табличного $F_{табл} = 5,32$ [9, 10] ($F_{рас} < F_{табл}$). Критерий Стьюдента составил 2,31. Уравнение (1) можно считать оптимальной математической моделью, так как оно работоспособно, и адекватно.

Графическая интерпретация исследуемых зависимостей представлена на рисунках 1 и 2.

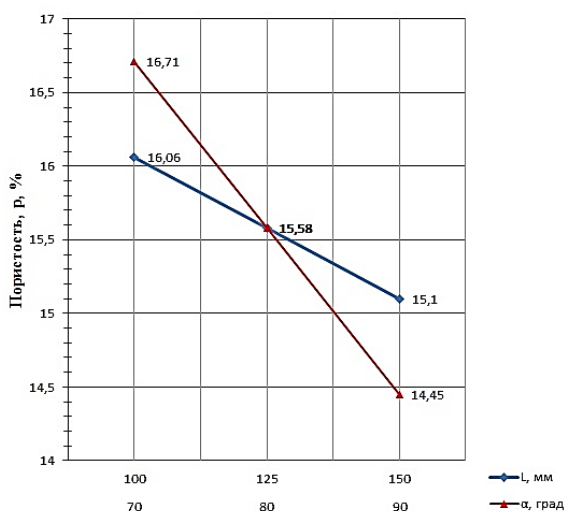


Рисунок 1. График зависимостей пористости покрытия от технологических параметров плазменного напыления (угла и дистанции напыления)

Из рисунка 2 видно, что по итогу исследований экспериментальные данные практически совпадают с фактическими показателями. Максимальная погрешность по

плану ПФЭ 2^2 составила 4 %, что говорит об адекватности и целесообразности проведенных исследований и расчетных операций [9, 10].

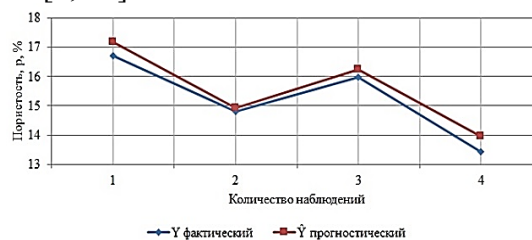


Рисунок 2. График зависимостей величины пористости от количества проводимых опытов (наблюдений)

Исследование влияния силы тока и гранулометрического состава порошка напыления

Экспериментальные значения пористости, полученные в каждом параллельном опыте (таблица 3), обозначены y_4, y_5, y_6 .

Рассчитанный критерий Кохрена (0,32) сравниваем с выбранным значением из таблицы для уровня значимости $\alpha=0,05$ с числом степеней свободы 2 и количеством наблюдений 4. Табличный критерий Кохрена (0,7679) больше рассчитанного, следовательно, процесс и опыты воспроизводимы. Иначе говоря, результаты наблюдений независимы, подчинены нормальному закону распределения, имеют одну и ту же дисперсию, и математические ожидания значений (отклика выходной переменной) будут равны истинным значениям целевой функции.

Таблица 3

Результаты опытов двухфакторного (дистанция и угол напыления) эксперимента

Номер опыта	y_4	y_5	y_6
1	15,6	13,9	14,9
2	14,6	15,6	16,1
3	16,7	17,8	17,4
4	18,7	18,5	17,2
5	15,8	17,1	17,2

Уравнение регрессии, адекватно описывающее экспериментальные данные и

удовлетворительно характеризующее внутреннюю область изучаемого факторного пространства:

$$p_2 = 16,4 + 0,9I - 0,25Q. \quad (2)$$

Полученное уравнение регрессии (2) адекватно описывает экспериментальные данные, так как расчетное значение критерия Фишера $F_{рас} = 3,693$ меньше табличного $F_{табл} = 5,32$ [9, 10] ($F_{рас} < F_{табл}$). Критерий Стьюдента составил 2,23. Уравнение (2) можно считать оптимальной математической моделью, так как оно работоспособно, и адекватно.

Графическая интерпретация исследуемых зависимостей представлена на рисунках 3 и 4.

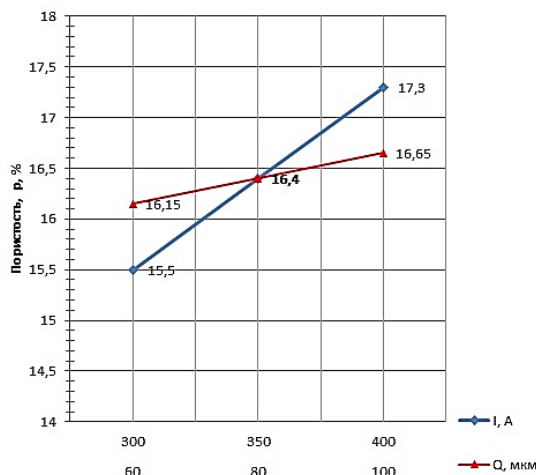


Рисунок 3. График зависимостей пористости покрытия от технологических параметров плазменного напыления (сила тока и гранулометрический состав порошка)

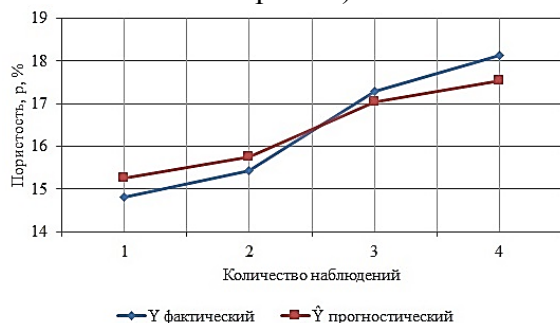


Рисунок 4. График зависимостей величины пористости от количества проводимых опытов (наблюдений)

Из рисунка 4 видно, что по итогу исследований экспериментальные данные практически совпадают с фактическими показателями. Максимальная погрешность по плану ПФЭ 2^2 составила 3,2 %, что говорит

об адекватности и целесообразности проведенных исследований и расчетных операций [9, 10].

Выводы

Исследован физико-механический параметр покрытия, такой как пористость, в зависимости от назначаемых технологических параметров, таких как сила тока, дистанция и угол напыления, а также параметра материала напыления – гранулометрический состав порошка.

Проведен регрессионный анализ влияния технологических режимов и параметров на пористость формируемого покрытия, в частности, проведено планирование двухфакторных экспериментов для исследования зависимости пористости формируемого покрытия от дистанции и угла напыления, силы тока и гранулометрического состава порошка напыления.

Получены уравнения регрессии, описывающие влияние на пористость покрытия указанных технологических параметров. Составлены графики полученных зависимостей и графики, обосновывающие адекватность проводимых исследований согласно критериям Кохрена, Фишера и Стьюдента.

Библиографический список

1. Черноиванов В.И. Организация и технология восстановления деталей машин / В.И. Черноиванов В.И. // М.: Агропромиздат, 1989. – 334 с.
2. Лебедев В.А. Принципы разработки ответственных деталей с учётом их напряженного состояния в процессе обработки / В.А. Лебедев, А.С. Кукаренко // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей. Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону: ДГТУ. 2021. – С. 510-513.
3. Соснин Н.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н.Е. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский // СПб: Изд-во Поли-техн. ун-та, 2013. – 406 с.

4. Li R.I. Conditions for Forming a Uniform Polymeric Coating on the External Surface of a Rotating Cylinder. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. 2016. Vol. 9. No. 1. – pp. 27-30.
5. Farrokhpanah A., Coyle T.W., Mostaghimi J. Numerical study of suspension plasma spraying // Journal of Thermal Spray Technology. 2017. V. 26. № 1-2. pp. 12-36. doi: 10.1007/s11666-016-0502-9.
6. Пузряков А.Ф. Исследование свойств плазменных покрытий на основе применения регрессионного анализа / А.Ф. Пузряков, И.Н. Кравченко, А.В. Коломейченко, И.Е. Пупавцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2015. № 10. – С. 28-32.
7. Mauer G., Schlegel N., Guignard A., Jarligo M.O. et al. Plasma spraying of ceramics with particular difficulties in processing // Journal of thermal spray technology. 2015. V. 24. №. 1–2. pp. 30-37. doi: 10.1007/s11666-014-0149-3.
8. Sharifullin S.N., Trifonov G.I., Vyachina I.N. Calculation of parameters of particles in a plasma jet and modeling of kinematic models of spraying of wear resistant material // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. V. 1058. (012047). doi: 10.1088/1742-6596/1058/1/012047.
9. Грачев Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин // Москва: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.
10. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский // Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Наука, 1976. – 279 с.
11. Кукарских Л.А. Разработка математической модели теплофизического процесса сухого трения / Л.А. Кукарских, Г.И. Трифонов // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формования и сборки изделий: сборник трудов научного симпозиума технологгов-машиностроителей. Донской государственный технический университет. Текст: электронный. Ростов-на-Дону: ДГТУ. 2021. – С. 241-245.
12. Ильин П.А. Использование критерия Кохрена для определения объема выборки данных при стендовых испытаниях на примере подшипниковых узлов дисковой бороны. Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. № 36. 2014. – С. 201-205.

Information about the paper in English

G.I. Trifonov

Air Force Military Educational and Scientific Center
Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy
Voronezh, Russia

E-mail: trifonov_gi@mail.ru

Receipt date: December 09, 2022

MULTIPLE-FACTOR EXPERIMENTS APPLIED TO STUDY PROPERTIES OF COATINGS APPLIED BY PLASMA SPRAYING

Abstract

The paper describes a potential application of the mathematical experiment planning, when studying porosity of coatings applied by plasma spraying. The regression equations obtained by experiments contribute to controlling main properties of the applied coatings depending on spraying modes. The implemented planning resulted in appropriate and working equations, showing dependence between the coating porosity on, firstly, current and a granulometric composition of sprayed functional powder, and, secondly, distance and angle of spraying. The paper includes the calculated dependency diagrams.

Keywords: plasma spraying, coating, porosity, current, distance and angle of spraying, granulometric composition of powder, regression analysis, multiple-factor experiment.



УДК 621.746.047:669.054.2

В.В. Точилкин

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: toch56@mail.ru

А.Н. Еремин

ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: a.n.eregin@mmk.mrk.ru

И.М. Ячиков

ФГАОУ ВО «Южноуральский государственный
университет (национальный
исследовательский университет)»
г. Челябинск, Россия
E-mail: iachikovim@susu.ru

Г.А. Подосян

Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия
E-mail: ga.podosuan@yandex.ru
Дата поступления 19.12.2022

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИЕМНОЙ КАМЕРЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША МНОГОРУЧЬЕВОЙ СЛЯБОВОЙ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Аннотация

Рассмотрена конструкция модернизируемого металлургического агрегата - промежуточного ковша МНЛЗ, оснащенного стопорами для регулирования движения потоков стали в кристаллизатор. Промежуточный ковш (ПК) оснащается устройством для приема вертикально падающей струи стали из сталеразливочного ковша - приемником металла, рациональная компоновка гидромеханических отверстий которого, позволяет обеспечить устойчивую работу оборудования ПК и получить качественный металл с низким содержанием неметаллических включений.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, кристаллизатор, промежуточный ковш, гидромеханика, конструкции огнеупорные.

Введение

В данной работе предложена новая компоновка оборудования промежуточного ковша четырех ручьевого слябовой машины. Представлены особенности конструкций специального приемника металла и специфики распределения потоков стали при использовании модернизированных конструкций [1, 2].

Основная часть

Основные элементы системы металлургических агрегатов, задающих условия

для приема и продвижения жидкого металла в кристаллизаторы слябовой машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), даны на рисунке 1 [3]. Одним из основных компонентов системы - промежуточный ковш (ПК) [4]. Рассматриваемая МНЛЗ обеспечивает получение непрерывно литых заготовок из двух кристаллизаторов в виде четырех ручьев. Внутреннее пространство каждого из кристаллизаторов разделено специальной перемычкой, что обеспечивает рациональную работу в зоне вторичного охлаждения конструкций машины для четырех ручьев. Наиболее сложный объект

в данной системе – промежуточный ковш. Он содержит одну приемную камеру и две разливочные. Каждая из разливочных камер снабжена двумя разливочными отвер-

стиями, над которыми расположены механизмы для дозирования стали в кристаллизаторы – стопорные устройства.

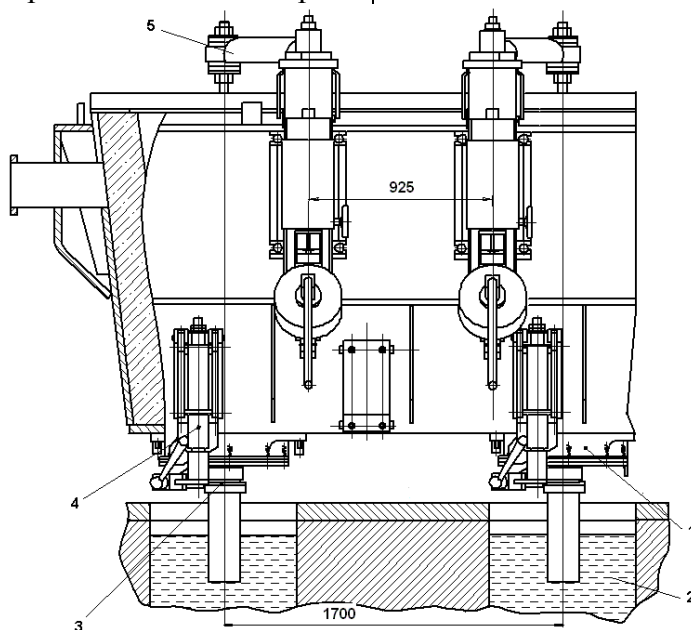


Рисунок 1. Элементы системы приемный (промежуточный) ковш – кристаллизатор: 1- ПК; 2 – кристаллизатор; 3 – погружной стакан; 4 – механизм замены погружного стакана

Для обеспечения рационального слива жидкой стали в агрегаты системы из сталеразливочного ковша (СРК) в ПК обязательно формируют приемную камеру. В заданном положении объема приемной камеры ПК, относительно струи стали из СРК, располагают металлоприемник (М). Для дальнейшего продвижения металла в ПК применяют различные конструкции внутреннего объема ПК: гасители, поперечные устройства – перемычки (перегородки, пороги), выступы и т.п. [5]. Конструкции разливочных агрегатов выполняют ключевую роль в создании условий для рационального перемещения струй металла, начиная от сталеразливочного ковша через защитную трубу СРК в ПК и далее через погружные стаканы в кристаллизаторы. Они выполнены в виде конструкций различной конфигурации, имеют специфическую компоновку. Для обеспечения рационального отделения неметаллических включений в объемах агрегатов системы необходимо обеспечивать рациональные периоды прохождения жидкого металла.

Для оценки разрабатываемых конструкций системы агрегатов приведены математическая постановка задачи и оценка

результатов расчета полей потоков жидкого металла. Основное внимание было уделено оценке распределения линий тока жидкого металла. При этом рассматривались элементы системы: при наличии разработанных модернизированных конструкций и без приспособлений для управления потоками жидкой стали, таких как приемник приемной камеры ПК, гасители, пороги и т.п. [7]. Предложены и составлены уравнения движения стали, уравнения неразрывности жидкости. Особое внимание уделено конфигурации рассматриваемым моделям агрегатов [8].

В качестве ПК рассматривается переливное распределительное устройство прямоугольной формы. Считаем, что поток жидкого металла непрерывно выливается их промежуточного ковша. В результате создаются условия стационарного течения жидкого металла, который представляем в виде вязкой и несжимаемой ньютоновской жидкости [6].

Для полной постановки задачи необходимо было: задать скорость потока металла у входного отверстия (скорость металла, поступающего из сталеразливочного ковша при наличии защитной трубы и без

нее); и давление у выходного отверстия (приняли равным атмосферному); приняли градиенты скоростей в плоскостях симметрии и на свободных поверхностях равными нулю; считаем вектора скоростей у твердых стенок (например, бортов промежуточного ковша) равным нулю [9].

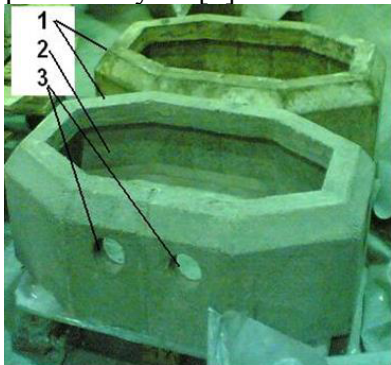


Рисунок 2. Приёмник жидкого металла из сталеразливочного ковша: 1 - приёмники; 2 – отверстие для прохождения металла из СРК; 3 – отверстия для распределения потоков металла

Задача состоит в том, что по данной геометрии агрегатов и узлов системы машины и параметров, для проходящей через рассматриваемые устройства жидкой стали, рассчитать следующие параметры: распределение и оценка скоростей в потоках; пространственное распределение параметров турбулентности; распределение неметаллических включений при движении.

Представлены конструкциям приемной камеры ПК для приема металла (рисунок 2). Оценка параметров движения потоков металла в приемной камере позволила разработать конфигурацию приемников металла и предложить варианты их расположения в камере. При разработке конструкций приемников металла из сталеразливочного ковша и месте их расположения учитывалась специфика расположения линий тока жидкого металла из СРК [10].

Было отмечено, что без устройств для регулирования движения металла в приемной камере поток обладает более развитой турбулентностью. Использование модернизируемых конструкций приемников металла в промежуточном ковше обеспечивает модельный поток более стабильным. Через отверстия 3 (см. рисунок 2) создаются наклонные затопленные струи металла в сторону разливочных камер, что

стабилизирует движение металла за стопами разливочных отверстий.

Особое внимание было уделено конструкциям отверстий приемников металла подающих металл в разливочные камеры ПК. С учетом специфики технологии разливки металла на МНЛЗ определены место расположения, размеры и угол наклона переливных отверстий из приемника металла [7].

Новые элементы ПК обеспечивают снижение массы используемых огнеупоров в ковше при сохранении качественных показателей металла.

Заключение

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований созданы конструкции систем распределения потоков (СРП) стали в приемной и разливочной камерах ПК многоручьевой слябовой МНЛЗ, на базе новых элементов СРП стали: донного металлоприемника с переливными боковыми отверстиями; перегородки с переливными отверстиями; блоков (порогов и блоков с подачей аргона) с переливными отверстиями.
2. Выявлено, что применение новых элементов СРП позволяет организовать рациональное течение металла по объему промежуточного ковша, снизить скорости металла в объеме ковша до допустимых (менее 0,12 м/с).
3. Наиболее важный результат исследований состоит в том, что показано, что применений новых конструкций в объеме агрегатов системы для прохождения жидкой стали обеспечивает стабилизацию турбулентных движений металла, распределению потоков металла способствующих удалению неметаллических включений по всей структуре объемов агрегатов МНЛЗ., что способствует получению качественной литой заготовки.

Библиографический список

1. Gushchin, V.N. Technical solutions for controlling flows of melts in the tundishes of continuous casters / V. N. Gushchin, V. A. Ul'yanov, V. A. Vasiliev // Metallurgist. 2011. Vol. 54, № 9/10. P. 591–593.

2. Непрерывная разливка стали. Расчеты медных кристаллизаторов / Ячиков И.М., Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ларина Т.П., Петров И.Е. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 190 с.
3. Конструкции и расчет металлоприемника промежуточного ковша симметричной одноручьевого МНЛЗ / Вдовин К.Н., Точилкин Вас. В., Добрынин С.М., Мельничук Е.А., Точилкин В.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. № 3. С. 25–30.
4. Модернизация и модельные исследования манипулятора для замены защитной огнеупорной трубы при непрерывной разливке стали / Еронько С.П., Данилов В.Л., Ткачев М.Ю., Тиняков В.В., Пономарева Е.А. // *Металлург*. 2020. № 4. С. 30–35.
5. Multiphase flow modeling of slag entrainment during ladle change-over operation / Rodolfo D. Morales, Saul Garcia-Hernandez, Jose de Jesus Barreto [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. Vol. 47. № 4. P. 2595–2606.
6. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ // *Новые огнеупоры*. 2015. № 11. С. 3–7.
7. Точилкин В.В. Методика расчета металлоприемника промежуточного ковша МНЛЗ // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2008. № 6. С. 44–47.
8. Гидравлический привод и средства автоматизации металлургических машин: учебник / Н.А. Чиченев, В.В. Точилкин, А.В. Нефедов, С.Н. Басков. Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2017. 198 с.
9. Chichenev N.A. Reengineering of the slab-centering unit of a roughing mill stand // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. №. 7-8. P. 701–706.
10. Sotnikov, A. L. Monitoring alignment of mold oscillatory motion with CCM process stream axis / A. L. Sotnikov, A. A. Sholomitskii // *Metallurgist*. - 2017. Vol. 60. №. 9/10. P. 1046–1053.

Information about the paper in English

V.V. Tochilkin

Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russia
E-mail: toch56@mail.ru

A.N. Eremin

PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works
Magnitogorsk, Russia
E-mail: a.n.eremin@mmk.mrk.ru

I.M. Yachikov

South Ural State University (National Research University)
Chelyabinsk, Russia

G.A. Podosyan

Ural Federal University
Yekaterinburg, Russia
E-mail: ga.podosuan@yandex.ru
Receipt date: December 19, 2022

MODERNIZING THE METALLURGICAL FACILITY, A TUNDISH OF A CONTINUOUS CASTING MACHINE, FACTORING INTO STEEL FLOWS IN THE TUNDISH

Abstract

The paper describes the structure of the modernized metallurgical facility, the tundish of the continuous casting machine, equipped with stoppers to control steel flows into the mold. The tundish is equipped with a steel reservoir of the receiving chamber of the tundish with a reasonable layout of hydromechanical holes to ensure a steady operation of the tundish equipment and produce good quality steel with low content of non-metallic inclusions.

Keywords: continuous casting machine, mold, tundish, fluid mechanics, refractory structures.



УДК 621.838.222

М.П. Шишкарёв, М.Д. Гавриленко
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет» (ДГТУ)
г. Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Дата поступления 14.10.2022

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Аннотация

Показано, что с уменьшением среднего радиуса поверхностей трения дополнительной фрикционной группой муфты повышенной точности срабатывания с комбинированной обратной связью увеличивается вращающий момент первой фрикционной группы и уменьшается вращающий момент второй фрикционной группы. Установлено, что модернизированная муфта обладает повышенной нагрузочной номинальной способностью по сравнению с аналогом, если отношение радиальных размеров дисков фрикционных групп больше величины соответствующей определенному числу пар трения при определенных размерах основной фрикционной группы.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, комбинированная обратная связь, коэффициент усиления, коэффициент трения, номинальная нагрузка.

Введение

Отличие адаптивной фрикционной муфты (АФМ) с комбинированной обратной связью от АФМ первого поколения [1] заключается в наличии дополнительной фрикционной группы (ДФГ), не охваченной обратной связью [2]. В результате этого ДФГ может передавать без буксования более высокий вращающий момент (в расчете на одну пару трения) по отношению к основной фрикционной группе (ОФГ), охваченной обратной отрицательной связью. Следовательно, базовый вариант АФМ с комбинированной обратной связью должен обладать более высокой номинальной нагрузочной способностью, т. е. передавать более высокую номинальную нагрузку при расчетном, т. е. минимальном, коэффициенте трения.

В качестве расчетного принимается минимальный коэффициент трения, с учетом которого производится расчет номинального вращающего момента АФМ [3].

Воздействие на нажимной диск нагрузки от ДФГ и линейный характер (в функции коэффициента трения) изменения его значения вызывают возникновение

большой, по сравнению с АФМ первого поколения, распорной (отжимной) силы, которая соответственно в большей степени отжимает друг от друга элементы пар трения ОФГ. Это приводит к определенному снижению передаваемой муфтой нагрузки [4].

Изложенное относится к АФМ с одинаковыми средними радиусами дисков трения фрикционных групп.

В работе [5] приведен вариант АФМ, в которой радиальный размер ОФГ меньше, чем аналогичный параметр ОФГ. Данная модернизация направлена на повышение стабильности нагрузки, передаваемой муфтой.

Уменьшение радиальных размеров фрикционных дисков приводит к соответствующему уменьшению вращающего момента, который может без буксования передавать ДФГ, и распорной силы, создаваемой УУ обратной связи. Следовательно, недостаточно изучен вопрос о влиянии радиальных размеров дисков трения ДФГ на нагрузочную номинальную способность муфты.

Постановка задачи исследования.
Исследование влияния радиальных размеров ОФГ на нагрузочную номинальную способность модернизированной АФМ.

Основная часть

Обратимся к базовому варианту АФМ с комбинированной обратной связью, кинематическая схема которой показана на

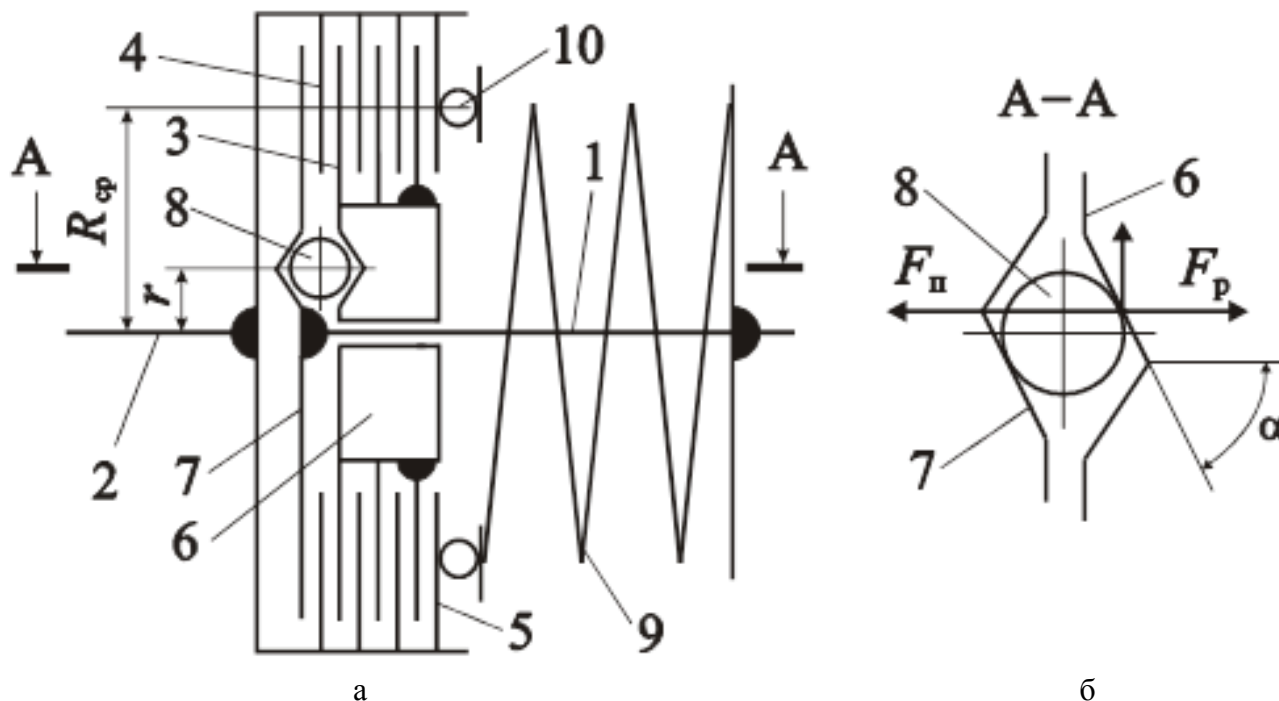


Рисунок 1. Кинематическая схема модернизированной АФМ

Диски связаны в окружном направлении со ступицей нажимного диска 6, а диски 4 – с барабаном полумуфты 2. Диск 5 связан также с барабаном полумуфты 2 и может перемещаться, вдоль оси. Аналогично диски 3 способны перемещаться по отношению к нажимному диску 6.

Крайний левый диск 4 упирается в упорный диск 7, жестко закрепленный на ступице полумуфты 1. В связи с этим, ОФГ имеет две части: ведущую, которая состоит из пары трения 4–7, и ведомую в виде пар трения 3–4–6. Указанное разделение принято на основе приоритета передачи нагрузки между полумуфтами 1 и 2. Диски трения 4–7 передают нагрузку на полумуфту 2, остальные диски – через УУ.

Управляющее устройство (УУ) АФМ состоит из тел качения 8, размещенных в скошенных гнездах дисков 6 и 7 (рис. 1, б, сечение А-А).

рисунке 1, а. Муфта состоит из полумуфт 1 и 2, которые передают нагрузку между собой двумя фрикционными группами: ОФГ, состоящей из фрикционных дисков 3 и 4, и ДФГ, включающей в свой состав фрикционный диск 5 и выполняющий функцию диска трения фланец нажимного диска 6.

Силовое замыкание пар трения ОФГ и ДФГ осуществляется при помощи центральной пружины 9, поставленной в муфту с предварительным натяжением и передающей усилие натяжения через упорный подшипник 10.

Оценку нагрузочной номинальной способности муфты в общем виде произведем на основе следующего выражения:

$$T_n = T_1 + T_2 + T_3, \quad (1)$$

где T_1 , T_2 , T_3 – предельные вращающие моменты, передаваемые соответственно парами трения 4–7, 3–4–6 и 5–6.

Целью исследования является получение научных результатов для сопоставления нагрузочной номинальной способности варианта АФМ с одинаковыми значениями средних радиусов поверхностей трения всех пар и варианта муфты, в которой радиальные размеры пары трения 5–6 меньше,

чем радиальные размеры остальных пар. Для этого получим сначала формулу для определения предельного значения вращающего момента АФМ с одинаковыми радиальными размерами ОФГ и ДФГ, а затем применим эту формулу для муфты с неодинаковыми радиальными размерами фрикционных групп, учитывая особенности последней.

Фрикционные диски 4–7, а также диски 3–4–6 подвержены действию одинаковых силовых факторов: действующие на них усилия замыкания пружины 9 и распорная сила одинаковы. С учетом этого имеем:

$$T_1 + T_2 = z_1 R_{cp} f_i (F_n - F_{p,i}), \quad (2)$$

где z_1 – полное число пар трения ОФГ; R_{cp} – средний радиус поверхностей трения дисков ОФГ; f_i – коэффициент трения между дисками ОФГ и ДФГ; F_n – сила натяжения замыкающей пружины 9; $F_{p,i}$ – распорная сила, возникающая между телами качения 8 и нажимным диском 6.

Распорная сила $F_{p,i}$ возникает при передаче нагрузки за счет вращающего момента нажимного диска 6. Данный момент равен нагрузке, которую передают фрикционные диски 3 и 4, и нагрузки, являющейся результатом момента сил трения между нажимным диском и диском 5. На основании этого запишем:

$$F_{p,i} = \frac{T_2 + T_3}{r} \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

где α – угол скоса боковой стенки гнезда под тело качения 8 (рисунок 1, сечение А-А); r – радиус окружности, на которой расположены тела качения 8 (рисунок 1, а).

Вращающий момент T_2 равен:

$$T_2 = z_2 R_{cp} f_i (F_n - F_{p,i}), \quad (4)$$

где z_2 – число фрикционных дисков ОФГ.

В режиме автоматического регулирования АФМ на пару трения 5–6 ДФГ распорная сила не действует при выполнении неравенства $F_{p,i} < F_n$. В противном случае муфта становится неадаптивной и на пару трения 5–6 начинает действовать распорная сила.

В работе [2] показано, что с целью до-

стижения наибольшей точности срабатывания АФМ второго поколения (базовый вариант) число пар трения ДФГ должно быть равно 1. В этом случае коэффициент усиления (КУ) выбирается максимальным [6].

В соответствии с этим запишем равенство для вращающего момента T_3 :

$$T_3 = F_n R_{cp} f_i. \quad (5)$$

Подставляя соотношения (4) и (5) в выражения (3), находим:

$$F_{p,i} = F_n C f_i \frac{z_2 + 1}{1 + z_2 C f_i}, \quad (6)$$

где C – КУ обратной связи:

$$C = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg} \alpha.$$

Подставляя в формулу (1) соотношения (2) и (5), с учетом выражения (6) в соотношении (2), запишем формулу предельного вращающего момента АФМ:

$$T_n = F_n R_{cp} f_i \frac{z_1 + 1 - (z_1 - z_2) C f_i}{1 + z_2 C f_i}. \quad (7)$$

В конструкциях АФМ с ведущими и ведомыми парами трения обычно принимают число ведомых пар меньше на единицу, чем полное количество пар трения ОФГ, т. е. $z_1 - z_2 = 1$. Для данного случая соотношение (7) запишем в следующем виде:

$$T_n = F_n R_{cp} f_i \frac{z_1 + 1 - C f_i}{1 + z_2 C f_i}. \quad (8)$$

На основе соотношения (8) можно сделать два следующие вывода:

– при одинаковом составе фрикционных групп АФМ первого поколения с разделенными парами трения и АФМ с комбинированной обратной связью (базовый вариант), равном $z_1 + 1$, нагрузка АФМ с одноконтурной отрицательной обратной связью выше на величину, равную:

$$\Delta T_n = F_n R_{cp} f_i \frac{C f_i}{1 + z_2 C f_i}; \quad (9)$$

– нагрузочная способность АФМ с комбинированной обратной связью (базовый вариант) в большей степени зависит от состава ОФГ и в меньшей – от параметров ДФГ.

Соотношение (9) показывает, что разность ΔT_n зависит от значения КУ C , слабо

возрастая при его увеличении. Следовательно, при максимальном значении КУ АФМ с комбинированной обратной связью (базовый вариант) в наибольшей степени отстает от АФМ первого поколения с разделенными парами трения по нагрузочной способности.

Основываясь на изложенной выше последовательности вывода формулы для определения нагрузки АФМ с комбинированной обратной связью (базовый вариант) и с одинаковыми средними радиусами всех поверхностей трения и на полученных результатах, найдем аналогичную зависимость для АФМ второго поколения, у которой радиальные размеры ДФГ меньше, чем ОФГ [5].

Допустим, что соотношение между радиальными размерами ОФГ и ДФГ определяется следующим равенством:

$$R_{cp.1} = nR_{cp}, \quad (10)$$

где $R_{cp.1}$ – средний радиус поверхностей трения фрикционных дисков ДФГ; n – коэффициент: $n < 1$, согласно поставленному условию.

С учетом равенства (10) запишем формулу (5) в виде

$$T_3 = nF_n R_{cp} f_i. \quad (11)$$

Произведя действия, аналогичные изложенным выше, и учитывая соотношение (11), имеем:

$$F_{p.i} = F_n C f_i \frac{z_2 + n}{1 + z_2 C f_i}. \quad (12)$$

Сопоставление соотношений (6) и (12) показывает, что в последнем случае распорная сила меньше, как и предполагалось выше. Следовательно, согласно соотношению (4), вращающий момент T_2 увеличивается, в соответствии с выражением (11) а вращающий момент T_3 – уменьшается.

С учетом формул (1), (2), (11) и (12) выражение для определения предельного вращающего момента T_n АФМ принимает вид:

$$T_n = F_n R_{cp} f_i \frac{z_1 + n - (z_1 - z_2) n C f_i}{1 + z_2 C f_i}. \quad (13)$$

Для сопоставления нагрузочной номинальной способности АФМ с комбинированной обратной связью (базовый вариант) и с одинаковыми и отличающимися друг от друга радиальными размерами ОФГ и ДФГ воспользуемся графическим способом. Однако, для того чтобы составить представление о характере изменения функции (13), исследуем ее. С этой целью установим предельное значение КУ C . Используя поставленное условие и формулу (12), найдем на основе равенства $F_n = F_{p.i}$:

$$C = \frac{1}{n f_i}.$$

Учитывая, что максимальная распорная сила имеет место при максимальном коэффициенте трения, запишем последнее соотношение в виде:

$$C_{max} = \frac{1}{n f_{max}}, \quad (14)$$

где f_{max} – максимальный коэффициент трения.

Очевидно, что рассматривать нагрузочную способность АФМ следует при номинальном (настроечном) значении коэффициента трения, в качестве которого, согласно данным работы [7], принимается минимальный коэффициент трения. Во всех остальных случаях, т. е. при $f_i > f_{min}$ (где f_{min} – минимальное значение, которое в процессе эксплуатации может принимать коэффициент трения), величина вращающего момента АФМ не может служить критерием нагрузочной способности муфты, поскольку превышает номинальную нагрузку, т. е. является перегрузкой, не характерной для нормального режима работы АФМ и привода машины в целом.

Учитывая сделанные замечания и формулу (14), запишем соотношение (13) в следующем виде:

$$T_n = F_n R_{cp} f_{min} \frac{z_1 n f_{max} + (n f_{max} - f_{min}) n}{n f_{max} + z_2 f_{min}}. \quad (15)$$

Для определения характера изменения функции (15) вычислим ее производную:

$$D(T_{\Pi})_n = \frac{z_1 z_2 f_{\min} f_{\max} + 2n^2 f_{\max} + 2z_2 f_{\min} f_{\max} - z_2 f_{\min}^2 - n^2 f_{\max}^2}{(n f_{\max} + z_2 f_{\min})^2}. \quad (16)$$

При вычислении производной (16) не учтены постоянные члены F_{Π} и $R_{\text{ср}}$.

Для того чтобы функция (15) была возрастающей по аргументу n , производная (16) должна быть положительной.

Корни квадратного неравенства относительно неизвестного n равны, с учетом выражения (16):

$$n_{1,2} = \frac{-z_2 f_{\min} f_{\max} \pm \sqrt{z_2^2 f_{\min}^2 f_{\max}^2 - z_2 f_{\min} f_{\max} (2 - f_{\max})(z_1 f_{\max} - f_{\min})}}{(2 - f_{\max}) f_{\max}}. \quad (17)$$

Для определения области решений неравенства необходимо установить знак дискриминанта корней (17). Предполагая, что $D > 0$ (где D – дискриминант корней (17)), и используя выражения (17), запишем следующее неравенство:

$$z_2 f_{\min} f_{\max} (2 - f_{\max})(z_1 f_{\max} - f_{\min}) > 0. \quad (18)$$

Разделим обе части неравенства (18) и, введя обозначение $f_{\max} / f_{\min} = m$ (где m – относительная ширина интервала изменения значения коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$), запишем следующее неравенство:

$$m < \frac{z_2 f_{\max} + 2 - f_{\max}}{z_1 (2 - f_{\max})}.$$

Учитывая, что $z_1 - z_2 = 1$, запишем последнее неравенство в следующем виде:

$$m < \frac{(z_1 - 2) f_{\max} + 2}{z_1 (2 - f_{\max})}. \quad (19)$$

Графики зависимости $m(z_1)$ согласно соотношению (19) приведены на рис. 2. Графики 1, 2, 3 и 4 построены по следующим исходным данным: $f_{\max} = 0,8; 0,7; 0,6; 0,5$ соответственно.

Анализ графиков показывает следующее:

- при всех принятых значениях параметров, входящих в соотношение (19), значения $m < 1$;
- с увеличением количества пар трения ОФГ требуемое значение коэффициента m , удовлетворяющее неравенству (18), уменьшается;
- с увеличением максимального коэффициента трения требуемое значение коэф-

фициента m , удовлетворяющее неравенству (18), увеличивается.

В соответствии с физическим смыслом коэффициента m он должен быть больше единицы [8], что противоречит данным рис. 2. Следовательно, неравенства (18) и (19) не выполняются при реальных значениях принятых параметров z_1, z_2, f_{\min} и f_{\max} , поэтому дискриминант корней (17) отрицателен.

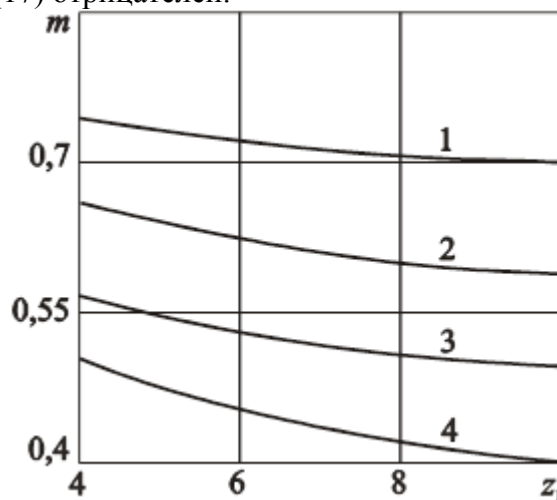


Рисунок 2. Зависимости $m(z_1)$

В практике расчета АФМ максимальное значение коэффициента трения принимают равным $0,8 \dots 0,9$ [9]. В связи с этим постоянный коэффициент при n^2 в числителе соотношения (16), равный $(2 - f_{\max}) f_{\max}$, положителен, и первая производная функции (16) также положительна при условии $n \in R$ (где R – множество действительных чисел). Следовательно, функция (15) является возрастающей по аргументу n , т. е. с уменьшением коэффициента n вращающий момент АФМ уменьшается.

Для АФМ второго поколения (базовый вариант) с одинаковой величиной среднего радиуса поверхностей трения ОФГ и ДФГ формула, согласно которой ограничивается максимальный КУ C , имеет вид:

$$C \leq \frac{1}{f_{\max}}$$

Подставляя последнее соотношение (в форме равенства) в выражение (8) и принимая $f_i = f_{\min}$, получаем:

$$T'_n = F_n R_{\text{ср}} f_{\min} \frac{(z_1 + 1)f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + z_2 f_{\min}} \quad (20)$$

Сопоставим номинальную нагрузку вариантов АФМ, используя для этого соотношения (15) и (20). Приравняв друг другу правые части указанных соотношений и произведя некоторые преобразования, получим следующее решение квадратного уравнения относительно неизвестного члена n :

$$n = \frac{A + \sqrt{A^2 + 4B}}{E}, \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} A &= f_{\max}^2 + (z_1 - 1)f_{\min}^2 - z_1(z_1 - 1)f_{\min}f_{\max}, \\ B &= (z_1 - 1)f_{\min}f_{\max}[f_{\max} + (z_1 - 1)f_{\min}](z_1f_{\max} + f_{\max} - f_{\min}) \\ E &= 2f_{\max}[f_{\max} + (z_1 - 1)f_{\min}]. \end{aligned}$$

Второй корень упомянутого квадратного уравнения не принят во внимание, поскольку он отрицателен, что, учитывая физический смысл коэффициента n , противоречит его отрицательному значению.

Для того чтобы составить представление о значении коэффициента n , удовлетворяющем равенству $T'_n = T_n$, в зависимости от параметров в соотношении (21), используем графический способ, выбрав в качестве аргумента параметр z_1 . Данный выбор объясняется тем, что параметр z_1 достаточно легко варьировать без изменения конструктивной схемы АФМ.

График функции $n(z_1)$, построенный на основе соотношения (21), приведен на рисунок 3. График построен по следующим данным: $f_{\min} = 0,1$, $f_{\max} = 0,8$.

График показывает, что значения коэффициента n уменьшаются при увеличении числа пар трения ОФГ, для того чтобы нагрузочная номинальная способность

муфт была равна друг другу. При минимальном значении параметра z_1 значение коэффициента n равно единице.

Поскольку выше установлено, что номинальная нагрузка АФМ с неодинаковыми радиальными размерами ОФГ и ДФГ увеличивается с увеличением коэффициента n , на основании графика можно заключить следующее:

- при $z_1 = 2$ и принятых значениях f_{\min} и f_{\max} (см. выше) АФМ с уменьшенными радиальными размерами ДФГ будет обладать большей, чем базовый вариант АФМ, нагрузочной номинальной способностью, если $n > 1$. Это значит, что для достижения более высокой номинальной нагрузки радиальные размеры ДФГ должны быть больше, чем у ОФГ;

- если $z_1 > 2$, то модернизированная АФМ будет обладать более высокой нагрузочной номинальной способностью по сравнению с АФМ, имеющей одинаковые радиальные размеры ОФГ и ДФГ, если коэффициент n больше, чем его значения, соответствующие определенным числам пар трения z_1 , согласно графику;

- с увеличением числа пар трения z_1 расширяется интервал значений коэффициента n , при которых нагрузочная номинальная способность АФМ с уменьшенными радиальными размерами ДФГ выше, чем у АФМ с одинаковыми радиальными размерами ОФГ и ДФГ.

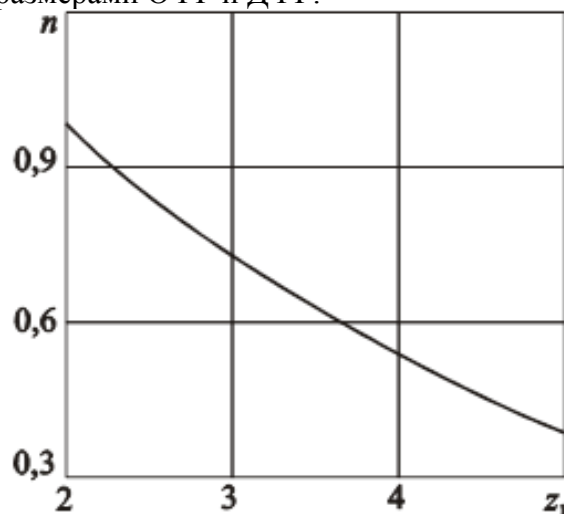


Рисунок 3. Зависимость коэффициента n от числа пар трения ОФГ

В работе [10] показано, что наибольшая стабильность передаваемой нагрузки АФМ второго поколения с неодинаковыми радиальными размерами ОФГ и ДФГ достигается при выполнении условия $n=0,85$. Сопоставление данного условия с данными кривой на рис. 3 показывает, что оно выполняется для всех значений $z_1 > 2$.

В работах [11, 12] приведены кинематические схемы АФМ второго поколения с двухконтурной отрицательной обратной связью и результаты исследования их основных характеристик. В частности, установлено, что нагрузочная характеристика этих АФМ может иметь точку максимума внутри интервала изменения значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$. Наличие экстремума внутри интервала $f_{\min} \dots f_{\max}$ зависит от параметров АФМ. Наибольшая стабильность передаваемой нагрузки АФМ будет в том случае, если при наличии точки максимума внутри интервала изменения значений коэффициента трения муфта может передавать одинаковую предельную нагрузку соответственно при значениях f_{\min} и f_{\max} .

Исследуемая в настоящей работе АФМ имеет одноконтурную отрицательную обратную связь, однако наличие второй (дополнительной) фрикционной группы позволяет предположить сходство ее нагрузочной характеристики с аналогичным показателем АФМ второго поколения с двухконтурной отрицательной обратной связью.

В связи с этим исследуем рассматриваемую АФМ на наличие указанных характерных особенностей.

Первая производная функции (13) по аргументу f_i , без учета ее положительного знаменателя и постоянных членов-множителей F_n и R_{cp} , равна:

$$T'_n(f_i) = z_2 C^2 f_i^2 + 2C f_i - (z_1 + n). \quad (22)$$

Приравнивая нулю правую часть выражения (22), приходим к квадратному уравнению относительно неизвестного f_i , корни которого равны:

$$f_{i(1,2)} = \frac{\pm \sqrt{1 + z_2(z_1 + n)} - 1}{z_2 C}. \quad (23)$$

Один из корней (23) заведомо отрицателен, поэтому для дальнейших исследований принимаем корень:

$$f_k = \frac{\sqrt{1 + z_2(z_1 + n)} - 1}{z_2 C}, \quad (24)$$

где f_k – критическое значение коэффициента трения, при котором АФМ обладает наибольшим предельным вращающим моментом.

При максимальном значении КУ C , определяемом по соотношению (14), выражение (24) принимает следующий вид:

$$f_k = \frac{(\sqrt{1 + z_2(z_1 + n)} - 1) n f_{\max}}{z_2}. \quad (25)$$

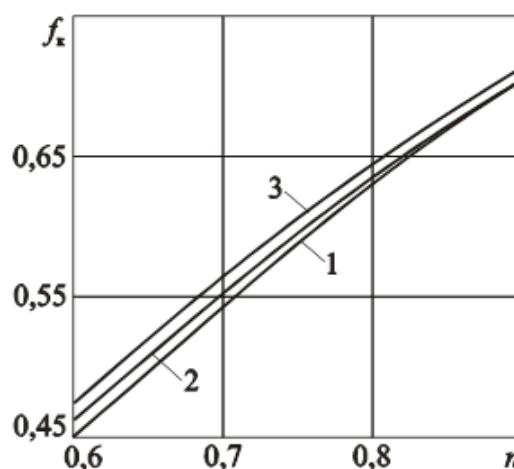


Рисунок 4. Зависимости коэффициента трения f_k от коэффициента n

Оценим возможность принадлежности значения f_k в интервал значений $f_{\min} \dots f_{\max}$ с помощью графического способа на основе графика зависимости $f_k(n)$ в соответствии с соотношением (25). При построении графика принимаем в качестве исходных следующие значения параметров: $z_1=4$, $z_2=3$, $f_{\max}=0,8$.

Кривая 1, изображенная на рис. 4, подтверждает попадание значений коэффициента трения f_k в упомянутый интервал: при всех принятых при построении графика значениях коэффициента n имеет место выполнение неравенства $f_k < f_{\max}$.

Влияние значений параметров z_1 и z_2 на коэффициент трения f_k отражено на рис. 4 кривыми 2 и 3, построенными соответственно при $z_1=6$, $z_2=5$ и $z_1=8$, $z_2=7$.

Значение коэффициента трения f_{\max} оставлено без изменений.

Анализ кривых 2 и 3 и сопоставление их с кривой 1 показывает, во-первых, что с увеличением общего числа пар трения ОФГ и, соответственно, числа ее ведомых пар трения значение f_k для каждого значения коэффициента n возрастает незначительно. Во-вторых, значение f_k увеличивается при увеличении коэффициента n . В-третьих, как и кривая 1, кривые 2 и 3 показывают, что величина коэффициента трения f_k не превышает коэффициент трения f_{\max} .

Для исследуемой АФМ максимальная перегрузка в приводе машины будет определяться значением коэффициента трения f_{\max} . Графики, изображенные на рис. 4, показывают, что максимальная перегрузка в приводе машины будет возрастать в следующих случаях:

- по мере увеличения коэффициента n
- для любого соотношения величин параметров z_1 и z_2 . Это объясняется увеличением радиальных размеров ДФГ;
- при увеличении параметров z_1 и z_2 , что приводит к росту номинального вращающего момента АФМ.

Оценим возможность равенства вращающих моментов при граничных значениях коэффициента трения из интервала $f_{\min} \dots f_{\max}$. Используя вместо параметра f_i параметры f_{\min} и f_{\max} в соотношении (13) и приравняв друг к другу составленные выражения, получим квадратное уравнение относительно неизвестного члена C , корни которого равны:

$$C_{1,2} = \frac{\pm \sqrt{(m+1)^2 n^2 + 4(z_1+n)z_2 mn} - (m+1)n}{2z_2 n f_{\max}}. \quad (26)$$

Из двух корней, согласно соотношению (26), необходимо выбрать корень, равный:

$$C = \frac{\sqrt{(m+1)^2 n^2 + 4(z_1+n)z_2 mn} - (m+1)n}{2z_2 n f_{\max}}, \quad (27)$$

поскольку второй корень заведомо отрицательный, что не согласуется с физическим смыслом параметра C (см. выше).

Оценим значение КУ C , с использованием соотношения (27), вычисляемое согласно выражению (14). Это необходимо выполнить для того чтобы установить, выходит ли найденное значение КУ C за предел, устанавливаемый выражением (14). В случае положительного результата условие, заключающееся в возможности достижения равенства друг другу величин вращающих моментов АФМ при значениях коэффициентов трения f_{\min} и f_{\max} , выполнимо.

Приравняв друг другу выражения (14) и (27), найдем корни квадратного уравнения:

$$n_{1,2} = \frac{-(z_1 m - m - 1) \pm \sqrt{(z_1 m - m - 1)^2 + 4z_2 m}}{2m}. \quad (28)$$

Многочлен в скобках корней (28) отрицателен в том случае, если выполняется следующее неравенство:

$$z_1 < (m+1)/m. \quad (29)$$

Даже при небольших значениях параметра m ($m=2 \div 3$) величина $z_1=1$ (согласно условию (29)), что неприемлемо, так как исследуется АФМ с разделенными параметрами трения ОФГ. Имея это в виду и учитывая, что, согласно физическому смыслу, коэффициент n может принимать только положительные значения, единственным корнем является корень:

$$n = \frac{\sqrt{(z_1 m - m - 1)^2 + 4z_2 m} - (z_1 m - m - 1)}{2m}.$$

С учетом соотношения между параметрами z_1 и z_2 запишем последнее выражение как:

$$n = \frac{\sqrt{(z_1 m - m - 1)^2 + 4(z_1 - 1)m} - (z_1 m - m - 1)}{2m}. \quad (30)$$

Расчеты, выполненные с использованием зависимости (30), показывают, что значение коэффициента n не зависит от состава ОФГ.

Учитывая, что по условию задачи значение КУ C , найденное по соотношению (27), должно быть равно либо меньше значения КУ согласно выражению (14), используя формулу (30), на основе составленного неравенства получаем, что оно выполняется в определенном интервале положительных значений коэффициента n ,

наибольшим из которых является $n=0,125$.

Следовательно, условие равенства вращающих моментов АФМ при значениях f_{\min} и f_{\max} выполняется только при значениях коэффициента $n \leq 0,125$, что, учитывая его физический смысл, технически не реализуемо на практике.

Получение экстремума нагрузочной характеристики АФМ в интервале $f_{\min} \dots f_{\max}$ также практически невозможно, поскольку максимум формально достигается при значении КУ, большем, чем его предельное значение, допускаемое по критерию стабильности передаваемой муфтой нагрузки.

Результаты исследования могут быть использованы на практике для расчета и проектирования модернизированной АФМ, обладающей повышенной нагрузочной номинальной способностью.

Выводы

1. При одинаковых конструктивных параметрах АФМ первого поколения с разделенными парами трения фрикционной группы и базового варианта АФМ второго поколения нагрузочная номинальная способность первой муфты выше.

2. Состав ОФГ базового варианта АФМ с комбинированной обратной связью в большей, чем параметры ДФГ, степени влияет на нагрузочную номинальную способность муфты.

3. С уменьшением радиального размера ДФГ АФМ с комбинированной обратной связью увеличивается момент сил трения ведомых пар ОФГ и уменьшается момент сил трения ДФГ.

4. При любом числе пар трения ОФГ с его увеличением нагрузочная способность АФМ с комбинированной обратной связью и АФМ с радиальным размером ДФГ одинакова по мере уменьшения последнего.

5. Нагрузочная номинальная способность АФМ с комбинированной обратной связью и с измененным радиальным размером ДФГ при наименьшем числе пар трения ОФГ выше, чем у базового варианта АФМ второго поколения, если радиальный размер ДФГ больше, чем у пар трения ОФГ.

6. Модернизированная АФМ с уменьшенным радиальным размером ДФГ обладает более высокой нагрузочной номинальной способностью по сравнению с базовым вариантом АФМ второго поколения, если величина отношения радиальных размеров ДФГ и ОФГ больше, чем его величина, соответствующая определенному числу пар трения ОФГ.

7. С увеличением числа пар трения ОФГ уменьшается нижнее граничное значение радиального размера ДФГ, при превышении которого нагрузочная номинальная способность АФМ второго поколения с уменьшенным радиальным размером ДФГ выше, чем у базового варианта АФМ второго поколения.

8. Наибольшая стабильность вращающего момента АФМ с уменьшенным радиальным размером ДФГ обеспечивается при любом, кроме минимального, числе пар трения ОФГ.

9. Для модернизированной АФМ с уменьшенным радиальным размером ДФГ возможно попадание значения критического коэффициента трения, соответствующего точке максимума вращающего момента АФМ, внутрь интервала изменения значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$.

10. Значение упомянутого критического коэффициента трения слабо возрастает по мере увеличения числа пар трения ОФГ и радиального размера ДФГ, не выходя за пределы интервала значений $f_{\min} \dots f_{\max}$.

11. Одинаковые вращающие моменты АФМ при минимальном и максимальном значениях коэффициента трения имеют место только при небольших, реально невыполнимых величинах радиального размера ДФГ.

12. Максимум величины вращающего момента АФМ с комбинированной обратной связью и с уменьшенным радиальным размером ДФГ внутри интервал значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$ практически недостижим, поскольку значение КУ, соответствующее упомянутому максимуму, превышает его предельную величину, допустимую по критерию точности срабатывания муфты.

Библиографический список

1. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Исследование адаптивной фрикционной муфты с комбинированной обратной связью // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 9. – С. 25–32.
2. Шишкарёв М.П. Улучшение эксплуатационных показателей адаптивных фрикционных муфт / ГОУ Рост. гос. акад. с-х. машиностроения, Ростов н/Д, 2008. – 148 с.
3. Фокин А.Е., Гавриленко М.Д., Шишкарёв М.П. Исследование адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения // Вестн. ДГТУ. – 2011. – Т. 11. – № 1 (52). – С. 49–56.
4. Ряховский О.А., Иванов С.С. Справочник по муфтам. – Л.: Политехника, 1991. – 384 с.
5. Есипенко Я.И., Паламаренко А.З., Афанасьев М.К. Муфты повышенной точности ограничения нагрузки. – Киев: Техніка, 1972. – 168 с.
6. Запорожченко Р.М. О характеристиках предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания // Изв. вузов. Машиностроение. – 1971. – № 1. – С. 48–52.
7. Тепинкичиев В.К. Предохранительные устройства от перегрузки станков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 112 с.
8. Кравчук С.В. Универсальные предохранительные муфты // Приводная техника. – 1998. – № 6. – С. 38–40.
9. Афанасьев М.К. Исследование фрикционных муфт повышенной точности ограничения нагрузки: Автореф. дис....канд. техн. наук: – Киев, 1971. – 21 с.
10. Зельцерман И.М. и др. Фрикционные муфты и тормоза гусеничных машин / И.М. Зельцерман, Д.М. Каминский, А.Д. Онопо. – М.: Машиностроение, 1965. – 238 с.
11. Запорожченко Р.М. Оптимальные характеристики предохранительных фрикционных муфт повышенной точности срабатывания // Изв. вузов. Машиностроение. – 1972. – № 7. – С. 32–36.
12. Запорожченко Р.М. Оптимальные параметры фрикционной предохранительной муфты // Изв. вузов. Машиностроение. – 1974. – № 5. – С. 21–27.

Information about the paper in English

M.P. Shishkarev, M.D. Gavrilenko
Don State Technical University (DSTU)
Rostov-on-Don, Russia
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Receipt date: October 14, 2022

SYNTHESIS OF AN ADAPTIVE FRICTION CLUTCH WITH A COMBINED FEEDBACK

Abstract

It is shown that by decreasing an average radius of friction surfaces by an additional friction group of the clutch of better operation accuracy with a combined feedback, torque of the first friction group increases and torque of the second friction group decreases. Modernized clutches are found to have higher nominal load capacity as compared to similar ones, if the ratio between radial dimensions of discs of friction groups is higher than the value at definite dimensions of a main friction group.

Keywords: adaptive friction clutch, combined feedback, gain ratio, friction ratio, nominal load.



УДК 621.73.06

Н.С. Кравцов, И.В. Тимохин
ООО «Надёжность ТМ»
г. Москва, Россия
Email: info@nadezhnost.com
Дата поступления 01.10.2022

ВЛИЯНИЕ ФРЕТТИНГ-ИЗНОСА НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРОВ МОЩНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССОВ

Аннотация

Рассмотрена проблема существенного увеличения действующих напряжений в радиусных галтелях рабочих цилиндров ковочных гидравлических прессов в результате протекания процессов фреттинг-износа. Предложена методика проведения конечно-элементного расчёта напряжённно-деформированного состояния рабочих цилиндров с учётом перераспределения площади контактной поверхности между рабочим цилиндром и архитравом; приведены результаты расчёта. Предложены технологические решения, позволяющие снизить значения действующих напряжений.

Ключевые слова: фреттинг-износ; конечно-элементный анализ; усталостная прочность; износ рабочих цилиндров мощных гидравлических прессов.

Введение

Мощные гидравлические прессы усилием 60 МН широко распространены на российских и зарубежных предприятиях. Они применяются для свободнойковки изделий из чёрных и цветных металлов. Простой данного оборудования, связанные с внезапными отказами, приводят к экономическим потерям, поэтому предупреждение возникновения данных отказов на этапе проектирования и ранних этапах эксплуатации поможет снизить вероятность незапланированных финансовых затрат.

В процессе эксплуатации при нагружении рабочим давлением в конструкции прессы возникают упругие деформации базовых деталей, которые, в свою очередь, приводят к взаимному проскальзыванию их сопрягаемых поверхностей. Данные взаимные проскальзывания измеряются десятками долями миллиметров, что создаёт необходимые условия для протекания процессов фреттинг-износа. Износ контактных поверхностей приводит к перераспределению напряжений, действующих в узлах гидравлических прессов, что в свою очередь снижает их прочностные параметры.

Основная часть

Под термином «фреттинг» понимают совокупность механических, физических и химических процессов, развивающихся в зонах контакта сопряжённых деталей при малых колебательных смещениях одной поверхности относительно другой [1]. Тот факт, что при фреттинге поверхности остаются в контакте, затрудняя продуктам износа возможность покинуть контактную область, оказывает ещё более негативное влияние на процесс изнашивания.

Стоит отметить, что интенсивность процессов фреттинг-износа находится в прямой зависимости с величиной взаимного смещения контактирующих поверхностей. Причём при значениях проскальзывания $\Delta > 0,1$ мм интенсивность износа значительно возрастает по линейному закону (рисунок 1).

В результате фреттинг-износа уменьшается площадь опорной поверхности контакта сопряжённых деталей, что приводит к тяжёлым последствиям, таким как фреттинг-усталость, т.е. к усталостным разрушениям деталей, повреждённых фреттинг-коррозией. Предел выносливости, деталей при этом может снижаться в 1,5...5 раз [2].

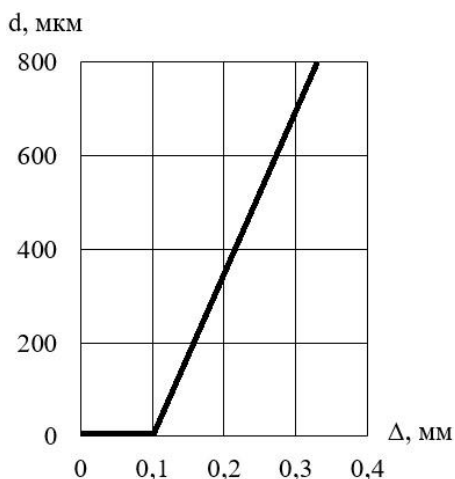


Рисунок 1. График зависимости интенсивности износа от величины взаимного проскальзывания контактных поверхностей деталей

Рассмотрим, как влияние процессов фреттинг-износа приводит к внезапным отказам рабочих цилиндров на примере вертикальных гидравлических ковочных пресов производства чешской фирмы Škoda и

отечественного УЗТМ. Оба прессы построены по традиционной схеме с четырёхколонной силовой рамой (Рисунок 2 а, б).

По результатам конечно-элементного расчёта, напряжения, действующие в радиусных галтелях опорных фланцев главных рабочих цилиндров прессов при проектных режимах эксплуатации, не превышали максимально допустимых значений. Максимальные напряжения растяжения для цилиндра прессы фирмы Škoda реализуются в зоне радиусного скругления днища и составляют $\sigma_1 = 176 \text{ МПа}$ (Рисунок 3 а). Для цилиндра конструкции УЗТМ зона концентрации максимальных растягивающих напряжений также локализована в галтели днища. Значение максимальных напряжений составляет $\sigma_1 = 134 \text{ МПа}$ (Рисунок 3 б). Цилиндры изготовлены из стали 30Л, предел усталости которой составляет $\sigma_0 = 250 \text{ МПа}$.

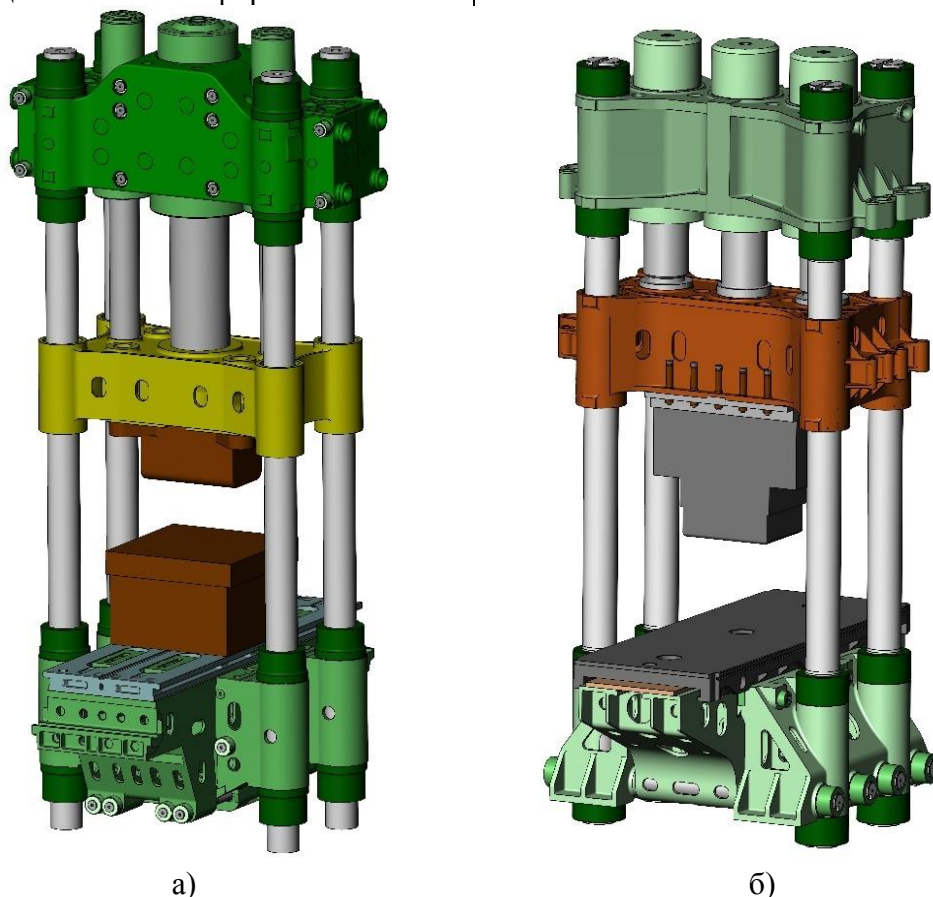


Рисунок 2. Ковочные гидравлические прессы усилием 60 МН
 а) Пресс производства фирмы Škoda
 б) Пресс производства УЗТМ

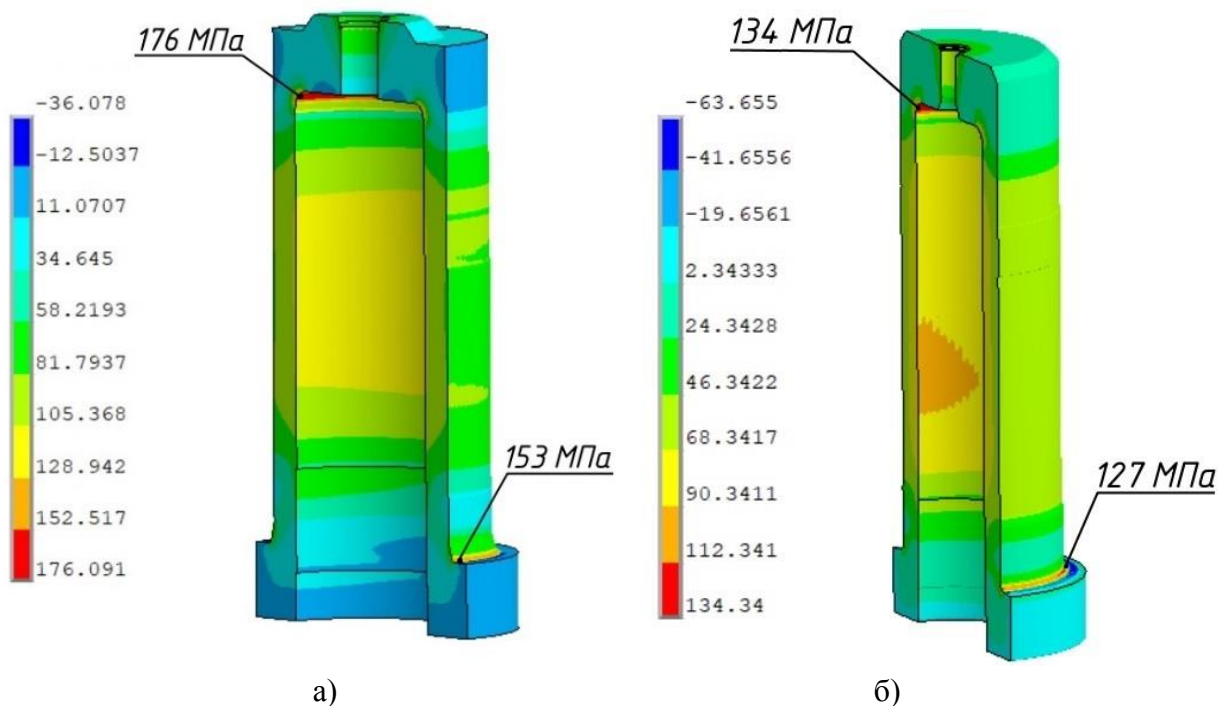


Рисунок 3. Напряжённое состояние цилиндров при проектных режимах эксплуатации, главные напряжения σ_1 , МПа

- а) Центральный цилиндр пресса Škoda усилием 60 МН
 б) Боковой цилиндр пресса УЗТМ усилием 60 МН

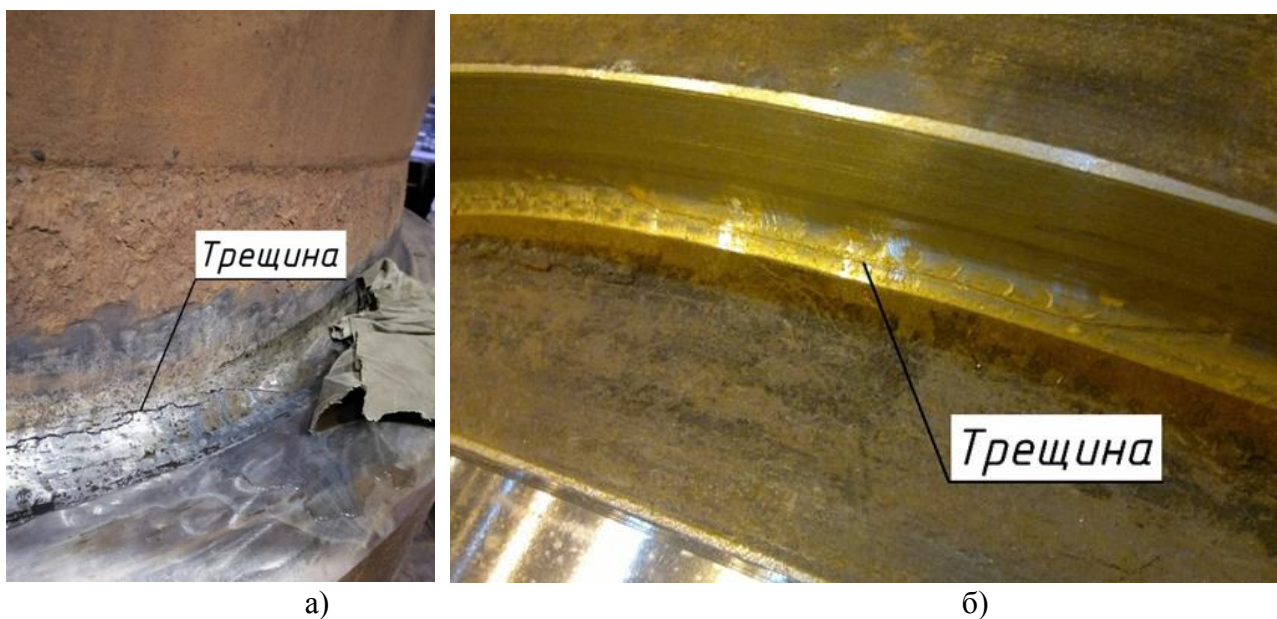


Рисунок 4. Фотографии трещин в радиусных скруглениях фланцев главных рабочих цилиндров
 а) цилиндр пресса Škoda
 б) цилиндр пресса УЗТМ

Коэффициенты запаса усталостной прочности для цилиндров, определённые из выражения (1) равны соответственно $n_{f1} = 1,4$ для пресса Škoda и $n_{f2} = 1,9$ для пресса УЗТМ.

$$n_f = \frac{\sigma_0}{\sigma_1^{max}}, \quad (1)$$

где σ_0 – предел усталостной прочности для стали 30Л;

σ_1^{max} – максимальные первые главные напряжения, действующие в конструкции.

Рекомендуемое значение коэффициента запаса по усталости для узлов и деталей крупногабаритных гидравлических прессов составляет $\{n\} = 1,2$ [3]. Расчётные

значения коэффициентов запаса усталостной прочности рассматриваемых цилиндров больше допустимого, что давало основания заявлять, о неограниченной долговечности данных деталей. Несмотря на это, оба цилиндра подверглись внезапному разрушению (рисунок 4).

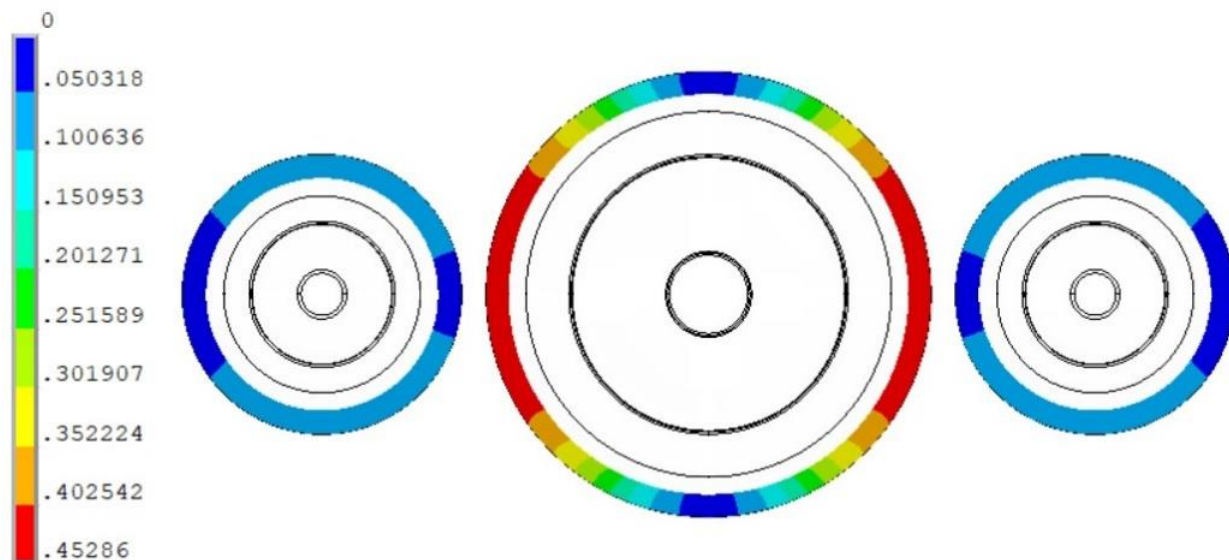


Рисунок 5. Поле смещений рабочих цилиндров пресса Škoda относительно архитрава

При длительной работе из-за протекающих процессов фреттинг-износа происходит изменение условий контактного взаимодействия базовых деталей, что, в свою очередь, приводит к возрастанию напряжений в галтели опорного фланца цилиндра до опасных значений. Для оценки указанного явления был проведён расчёт напряжённого состояния цилиндров прессов с учётом протекания процессов износа в программном комплексе ANSYS.

Анализ распределения поля взаимных смещений контактирующих поверхностей узла «архитрав-рабочий цилиндр» пресса Škoda показал, что величина проскальзывания между фланцем центрального цилиндра и опорной поверхностью архитрава достигает значения $\Delta = 0,45$ мм. Причём зона, в которой возникают подобного рода проскальзывания, составляет около 50% всей опорной поверхности контакта (рисунок 5)

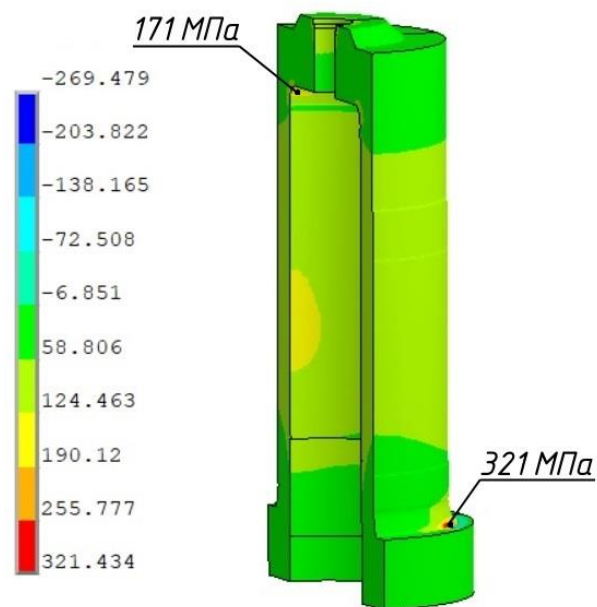


Рисунок 6. Напряжённое состояние центрального цилиндра пресса Škoda с учётом влияния процесса фреттинг-износа, главные напряжения σ_1 , МПа

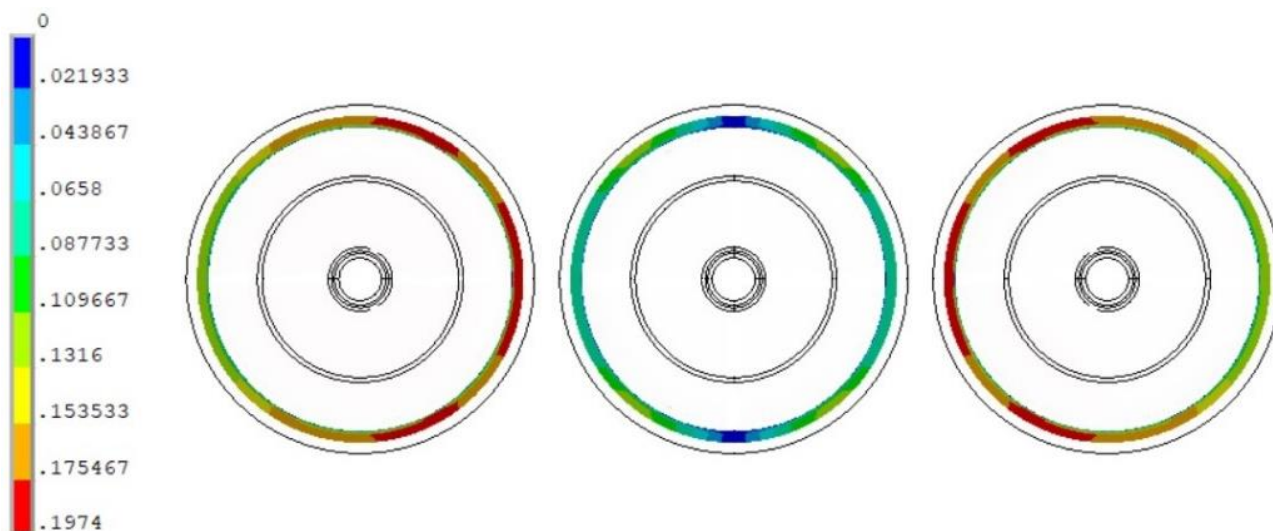


Рисунок 7. Поле смещений рабочих цилиндров пресса УЗТМ относительно архитрава

Для качественного анализа влияния фреттинг-износа был проведён расчёт напряжённого состояния цилиндра с учётом износа указанной зоны, путём удаления её из области контакта. Проведённый расчёт показал, что в результате уменьшения площади контакта, напряжения в радиусной галтели фланца цилиндра выросли более чем в 2 раза: с $\sigma_1 = 153$ МПа при проектном режиме эксплуатации до $\sigma_1 = 321$ МПа в условиях протекания процессов износа (рисунок 6). Полученное значение превышает предел усталостной прочности материала цилиндра, который составляет $\sigma_0 = 250$ МПа.

Конечно-элементный расчёт напряжённого состояния конструкции пресса УЗТМ 60 МН показал, что благоприятные условия для протекания процессов фреттинг-износа реализуются для узла «архитрав-боковой цилиндр». Для большей части опорной поверхности фланца цилиндра (около 70% от всей площади контакта) значения проскальзывания находятся в диапазоне 0,15-0,20 мм (рисунок 7).

Статический расчёт конструкции, учитывающий уменьшение площади контактной поверхности в процессе износа, показал, что напряжения в зоне радиусной галтели фланца возрастают в 2,8 раза: с 127 МПа при проектном режиме, до 356 МПа в условиях неполного контакта (рисунок 8).

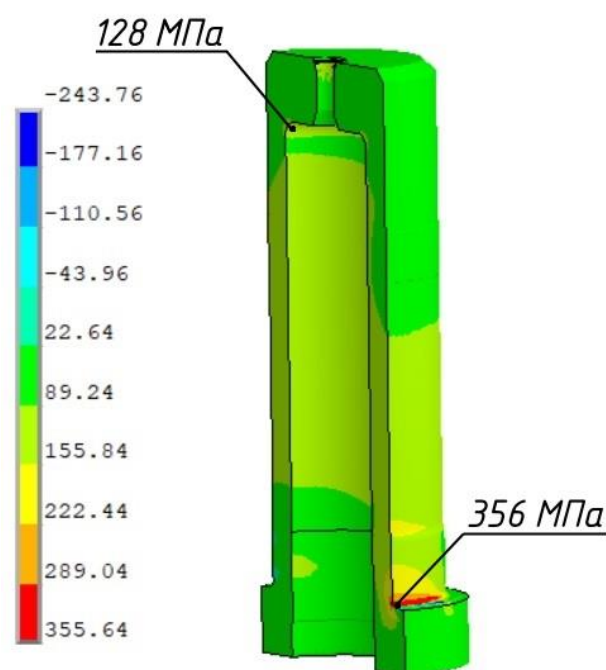


Рисунок 8. Напряжённое состояние бокового цилиндра пресса УЗТМ с учётом влияния процесса фреттинг-износа, главные напряжения σ_1 , МПа

Анализ проделанных расчётов показал, что процесс фреттинг-износа представляет серьёзную опасность для рабочих цилиндров мощных гидравлических прессов, т.к. уменьшение зоны контакта приводит к значительному увеличению действующих напряжений.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что в конструкциях рассмотренных прессов узел

«архитрав-рабочий цилиндр» имеет предрасположенность к протеканию процессов интенсивного фреттинг-износа. Принимая во внимание тот факт, что гидравлические прессы, построенных по традиционной схеме, имеет схожую конструкцию, можно сделать вывод, что данный узел подвержен влиянию процессов фреттинг-износа, приводящих к зарождению усталостных трещин в зоне радиусного скругления опорных фланцев рабочих цилиндров.

Заключение

В заключении следует отметить, что для обеспечения долговечности крупных металлургических машин, на стадии проектирования следует проводить предварительный расчёт взаимного проскальзывания сопрягаемых деталей. Исходя из полученных результатов, проводить анализ надёжности конструкции по предложенной методике и, при необходимости, вносить конструктивные изменения, которые бы обеспечили сведение взаимных проскальзываний к минимуму.

Особое внимание стоит уделить зоне радиусного скругления опорного фланца цилиндра. Добиться увеличения коэффициента запаса прочности данной зоны можно путём локальной пластической деформации, например, упрочняющей накаткой.

Также одним из способов увеличения долговечности является внесение изменения в конструкцию цилиндра – увеличение радиуса галтели [4].

Для предупреждения внезапных отказов металлургического оборудования, находящегося в эксплуатации, рекомендуется проводить периодическую экспертизу фактического состояния его базовых деталей. При выявлении факта износа контактных поверхностей сопряжённых деталей проводить восстановительно-ремонтные работы для обеспечения взаимного прилегания по всему периметру.

Библиографический список

1. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Учебное пособие. – Высшая школа, 1991.
2. Петухов А. Н. Фреттинг и фреттинг-усталость конструкционных материалов и деталей //М.: ФГУП" Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова. – 2014.
3. Розанов Б. В. Гидравлические прессы. М.: Машгиз, 1959.
4. Коркин Н. П. и др. Анализ отказов, предупреждение разрушений и восстановление базовых деталей мощных гидравлических прессов //Технология легких сплавов. – 2006. – №. 1-2. – С. 181-189.

Information about the paper in English

N.S. Kravtsov, I.V. Timokhin
LLC Reliability of Heavy Machinery
Moscow, Russia
E-mail: info@nadezhnost.com
Receipt date: October 01, 2022

EFFECT OF FRETTING WEAR ON THE STRESS AND STRAIN STATE OF CYLINDERS OF HEAVY HYDRAULIC PRESSES

Abstract

The paper describes a problem of a significant increase in existing stresses in radial fillets of working cylinders of forging hydraulic presses as a result of fretting wear. The authors suggest a procedure for carrying out the finite element analysis of the stress and strain state of operating cylinders, factoring into a redistribution of an area of the contact surface between the working cylinder and the crown. The resulting calculations are given by the authors. The paper contains process solutions aimed at reducing the existing stresses.

Keywords: fretting wear, finite element analysis, fatigue strength, wear of operating cylinders of heavy hydraulic presses.



УДК 621.73.06

В. Е. Мельникова
ООО «НПЦ Моденжи»
г. Брянск, Россия
E-mail: info@modengy.ru
Дата поступления 01.10.2022

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В МЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация

В работе рассмотрена технология твердой смазки и применение материалов, ее реализующих, в оборудовании металлургической промышленности для снижения трения, увеличения ресурса работы и обеспечения длительной защиты от коррозии. Обобщен успешный опыт использования антифрикционных твердосмазочных покрытий, антиадгезионных покрытий и твердосмазочных паст в оборудовании для холодной штамповки металлов, литья металлов и сплавов, редуцирования металла, на ковшах роботизированных комплексов для сбора гартцинка из ванны горячего цинкования, в прокатных клетях, подшипниковых узлах правильно-отрезных станков, цепных передачах подъемников, на упорной резьбе конусных дробилок металлдобывающих предприятий.

Ключевые слова: снижение трения, снижение износа, трение, износ, антифрикционное покрытие, твердосмазочное покрытие, защита от коррозии, надежность, ресурс, твердая смазка, сухая смазка, смазочное покрытие, противозадирная паста.

Введение

Антифрикционные твердосмазочные покрытия от российской компании «Моденжи» предназначены для снижения трения, износа, защиты от коррозии деталей оборудования из различных сфер промышленности. Покрытия нашли широкое применение и в металлургической отрасли для повышения ресурса оборудования для литья металлов и сплавов, холодной штамповки и редуцирования металлов, повышения производительности процессов сбора отходов из ванны цинкования, монтажа и настройки дробильного оборудования на рудниках и выполнения прочих задач.

Основная часть

О технологии твердой смазки и материалах MODENGY, ее реализующих. По мере развития технологий и появления необходимости эксплуатации узлов оборудования в экстремальных условиях, применения широкоизвестных пластичных и жидких смазочных материалов стало недостаточным для обеспечения стабильной работы механизмов.

В связи с этим набирают популярность материалы, реализующие технологию твердой смазки. Они представлены в виде порошков веществ слоистой кристаллической структуры (дисульфида молибдена, графита), некоторых полимеров (политетрафторэтилена), а также мягких металлов.

В процессе трения нанесенные на сопряженные детали порошки твердосмазочных веществ заполняют микронеровности поверхностей, формируя тонкую гладкую пленку с низким сопротивлением сдвигу и высокой несущей способностью. Благодаря этому обеспечиваются низкий коэффициент трения, защита от задиров, повышение срока службы в экстремальных режимах эксплуатации.

Антифрикционные твердосмазочные покрытия, выпускаемые под торговой маркой MODENGY (рисунок 1), содержат в своем составе высокодисперсные частицы твердых смазочных веществ, связующие компоненты, растворители и функциональные добавки.

Покрытие представляет собой суспензию, которая после нанесения на подготовленную деталь методом распыления и отверждения согласно технологической инструкции (в печи либо при комнатной температуре) формирует на поверхности прочно сцепленный с ней тонкий смазочный слой.

Этот композиционный слой представляет собой матрицу связующего вещества, в ячейках которой распределены частицы твердосмазочных веществ. Растворитель в процессе отверждения испаряется из состава покрытия.



Рисунок 1. Антифрикционные твердосмазочные покрытия MODENGY

Применение антифрикционных твердосмазочных покрытий позволяет полностью отказаться от жидких и пластичных смазочных материалов. С их помощью создаются необслуживаемые узлы трения: составы наносятся однократно и работают в течение всего срока эксплуатации изделий, обеспечивая необходимые смазывание и защиту поверхностей.

Антифрикционные твердосмазочные покрытия MODENGY эффективны в экстремальных условиях эксплуатации – при высоких контактных давлениях, высоких либо криогенных температурах, малых скоростях перемещения, воздействии химически агрессивных и коррозионно-активных сред, радиации, в вакууме. В некоторых случаях применение этих материалов позволяет отказаться от дорогостоящих сталей и сплавов. Ряд покрытий MODENGY обладает высокими антиадгезионными свойствами.

Еще одним видом материалов, реализующих технологию твердой смазки, являются пасты. Они представляют собой по-

рошки твердых смазочных веществ, распределенные в базовом масле для повышения адгезии и удобства нанесения.

Покрытия и твердосмазочные пасты MODENGY широко распространены во всех отраслях промышленности, в том числе и в металлургии.

Примеры применения антифрикционных твердосмазочных покрытий в металлургической промышленности. Антифрикционные твердосмазочные покрытия и пасты MODENGY разных марок нашли широкое применение в оборудовании металлургического комплекса. Они выполняют задачи по снижению трения, защите от образования задиров и закусываний, предотвращению налипания частиц металла на поверхности технологической оснастки и прочие.

Ковши роботизированных систем для сбора гартцинка. Предприятия, работа которых связана с технологией горячего цинкования, сталкиваются с необходимостью сбора такого отхода производства, как гартцинк или дросс. Побочный осадочный продукт, находясь в ванне цинкования, ухудшает качество создаваемого цинкового покрытия. Кроме того, он содержит в своем составе до 95 процентов цинка и может быть повторно переработан.

Для сбора гартцинка все чаще применяются роботизированные комплексы, которые позволяют автоматизировать трудоемкий процесс удаления дросса с поверхности расплавленного цинка.

Рабочими инструментами роботизированных комплексов, с помощью которых осуществляется вылавливание и извлечение гартцинка, являются металлические ковши. Дросс прилипает к их поверхностям, нарушая технологический процесс.

Для решения данной проблемы и повышения производительности работы на всю поверхность ковшей для сбора отходов в ванне цинкования наносится высокотемпературное антиадгезионное покрытие MODENGY 1054 (рисунок 2).



Рисунок 2. Ковши роботизированных систем для сбора гартцинка с покрытием MODENGY 1054

Данный материал образует на деталях устойчивый разделительный слой, который препятствует налипанию остаточных продуктов на поверхности ковша. Покрытие эффективно работает в условиях падения расплавленных капель, загазованности воздуха и высоких температур – до +650 °С. Формы для литья металлов и сплавов. Одним из наиболее распространенных способов придания металлам определенной формы является их литье. Для этого используют как одноразовые, так и многоразовые металлические емкости, повторяющие конфигурацию будущего изделия. При серийном производстве продукции целесообразно применение металлических форм, преимущественно из стали.

В процессе литья ко внутренней поверхности многоразовых форм прилипают металлы и сплавы, из-за чего усложняется выемка отлитых деталей и снижается их качество. После извлечения остывших металлических элементов на стенках форм остается некоторое количество металла, сложно поддающееся удалению.

Чтобы предотвратить прилипание, используются покрытия MODENGY, обладающие высокой термостойкостью и отличными антиадгезионными свойствами – MODENGY 1007 и MODENGY 1054 (рисунок 3).

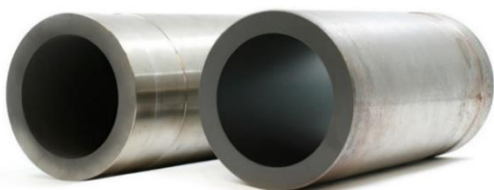


Рисунок 3. Формы для литья металлов и сплавов с покрытиями MODENGY

Устойчивый разделительный слой покрытий препятствует прямому контакту расплавленного металла и поверхности формы, благодаря чему облегчается выемка готовых изделий и обеспечивается высокое качество их поверхностей, повышается срок службы оборудования.

Оборудование для холодной штамповки металлов. Холодная штамповка заключается в деформации металла под давлением. Она осуществляется при помощи специализированного оборудования – штампов. Для направления движения плиты прессы используются колонки и втулки. В процессе штамповки направляющие детали подвергаются очень высокому трению и быстро изнашиваются. При работе в агрессивной среде на элементах образуется коррозия.

Для увеличения ресурса оборудования на колонках в втулках штампов применяется антифрикционное твердосмазочное покрытие MODENGY 1005 на основе дисульфида молибдена (рисунок 4). Оно создает гладкий слой, облегчающий скольжение и снижающий трение подвижных частей.



Рисунок 4. Колонки и втулки штампов с покрытием MODENGY 1005

Материал обладает отличными противозадирными и антикоррозионными свойствами (более 720 часов защиты от коррозии по результатам ускоренных испытаний в соляном тумане по стандарту ISO 9227), высокой несущей способностью (2500 МПа) и хорошей адгезией к металлу.

Покрытие полимеризуется при нагреве. После отверждения на поверхности втулок и колонок образуется устойчивый сухой слой, который не смещается с

места нанесения и не нуждается в обновлении на протяжении длительного времени. Благодаря применению MODENGY 1005 значительно снижается износ оборудования для холодной штамповки даже после многочисленных циклов работы.

Также, для холодной штамповки аустенитных и ферритных сталей, алюминия и его сплавов, меди и латуни, в технологических процессах глубокой вытяжки, чеканки, клеймения, гибки, холодной экс-

трузии алюминия и других металлов применяется покрытие MODENGY 1020 на основе синтетического воска.

Данное разделительное покрытие показало наилучшие результаты в процессе триботехнических испытаний на определение коэффициентов трения покоя и скольжения (рисунок 5), противоизносные и противозадирные свойства. По всем критериям MODENGY 1020 превзошло участвовавший в исследованиях зарубежный аналог, рекомендованный для применения в процессе обработки металлов.

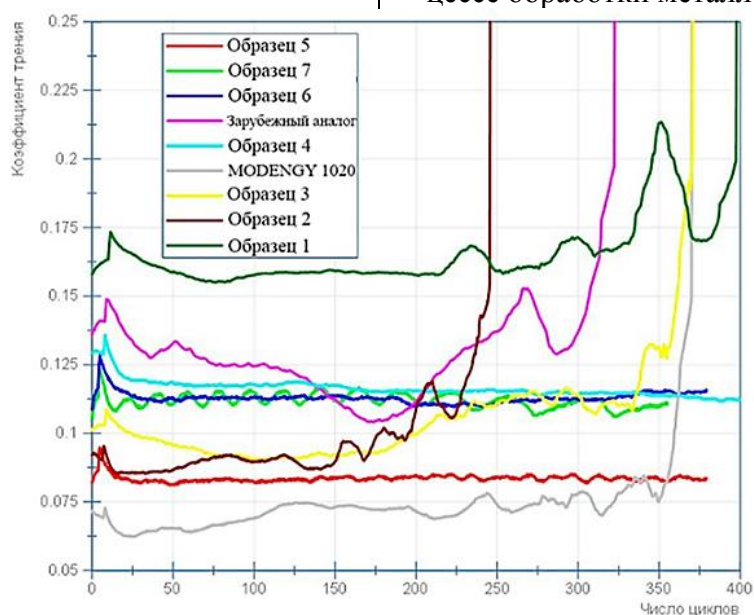


Рисунок 5. Графики изменения коэффициентов трения в зависимости от количества циклов прохода сферического индентора по смазанной поверхности

Оборудование для редуцирования металла. В процессе холодной деформации металла эффективно использование антифрикционного твердосмазочного покрытия MODENGY 1001 на основе дисульфида молибдена и графита. Оно предотвращает образование задиров и шероховатостей на редуцированных поверхностях деталей.

Покрyтие наносится методом распыления из аэрозольного баллона или распылительного пистолета на металлические заготовки, поперечное сечение которых необходимо уменьшить.

Тонкий смазочный слой, который образуется на поверхности детали, предотвращает повреждение заготовки в процессе ее деформирования на станке. Как показывает практика, состояние редуцированных дета-

лей при условии применения антифрикционного покрытия MODENGY 1001 удовлетворительное – поверхности гладкие без задиров.



Рисунок 6. Упорная резьба конусной дробилки с покрытием MODENGY 1003

Конусные дробилки. Антифрикционное твердосмазочное покрытие MODENGY 1003 на основе дисульфида молибдена и графита используется для облегчения монтажа и настройки конусных дробилок на

крупных месторождениях полезных ископаемых – медно-молибденовых руд, драгоценных металлов (рисунок 6).

Материал наносится на упорную резьбу деталей, посредством которой части конструкции соединяются между собой.

В процессе монтажа конусных дробилок на резьбовые элементы воздействуют экстремально высокие нагрузки при очень низкой скорости движения деталей друг относительно друга. При сборке дробилок в таких условиях на витках резьбы возникает большое количество задиров и закусываний, детали подвергаются заеданию и сложно поддаются монтажу.

Как показывают испытания производителя конусных дробилок, обеспечить легкую сборку при полном исключении повреждения контактирующих поверхностей резьбовых частей деталей возможно только при условии применения твердосмазочного покрытия. Пластичные смазочные материалы не способны обеспечить разделительную пленку, работоспособную в условиях высоких нагрузок при медленном скольжении – на деталях образуется большое количество закусываний.

Благодаря высокой несущей способности, противозадирным свойствам, сухой текстуре покрытие MODENGY 1003 обеспечивает штатную сборку конусных дробилок. Слой покрытия не вытесняется из зоны контакта, не притягивает пыль и другие мелкие частицы (не стимулирует абразивный износ).



Рисунок 7. Нанесение покрытия MODENGY 1003 на резьбу конусных дробилок

Нанесение антифрикционного твердосмазочного покрытия на детали конусных дробилок осуществляется в полевых условиях – на территории предприятий по

добыче полезных ископаемых непосредственно перед началом монтажных работ (рисунок 7). MODENGY 1003 не требует нагрева для полимеризации и готово к работе спустя 12 часов после нанесения.

Прокатные клетки. MODENGY 1001 наносится на бронзовые втулки прокатных клеток в качестве разделительного покрытия для предотвращения сцепления их поверхностей с чугунными прокатными шайбами и валами из высоколегированного стального сплава под воздействием высокого давления.

Применение покрытия позволяет обеспечить стабильность процессов запрессовки и распрессовки прокатных шайб с рабочих валов без «залипания», увеличить срок службы деталей.

Станки СПО. Подшипниковые узлы правильно-отрезных станков, а также цепные передачи подъемников преждевременно изнашиваются из-за высокого трения. Для обеспечения стабильной работы и повышения ресурса деталей применяется твердосмазочная паста на основе дисульфида молибдена MODENGY 4002 (рисунок 8).

Результатами испытаний на технологическом оборудовании цеха горячего цинкования была доказана целесообразность применения данного материала для снижения трения. Испытания проводились при нагрузке, соответствующей условиям эксплуатации оборудования. Температура при работе подшипникового узла находилась в диапазоне от +55 °С до +68 °С. Паста испытывалась на антифрикционные и противозносные свойства, текучесть при воздействии повышенных температур.

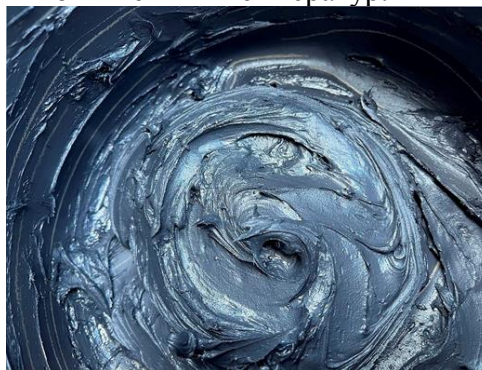


Рисунок 8. Твердосмазочная паста MODENGY 4002

После успешного прохождения пастой указанных испытаний было принято решение о ее применении на оборудовании металлургического предприятия.

Заключение

Применение антифрикционных твердосмазочных материалов MODENGY обеспечивает поверхностям уникальный комплекс триботехнических и защитных свойств, что позволяет эффективно управлять трением, повышать ресурс и эффективность работы оборудования металлургических предприятий.

Библиографический список

1. Modengy. Modengy – покрытия для снижения трения: [сайт]. URL: <https://modengy.ru/about/> (дата обращения 19.11.2022).
2. Технология твердой смазки MODENGY: новые возможности в России [Электронный ресурс] URL: <https://modengy.ru/articles/novye-vozmozhnosti-po-primeneniyu-tekhnologii-antifriktsionnykh-tverdostmazochnykh-pokrytiy-v-nashey-/> (дата обращения 20.11.2022).
3. Определение триботехнических свойств разделительных покрытий для холодной штамповки, разработанных ООО "Моденжи". [Электронный ресурс] URL: <https://modengy.ru/information/our-tests/tribotekhnicheskie-ispytaniya/opredelenie-tribotekhnicheskikh-svoystv-razdelitelnykh-pokrytiy-dlya-kholodnoy-shtampovki-razrabotan/> (дата обращения 23.11.2022).
4. Сентюрихина, Е.М. Твердые дисульфидмолибденовые смазки / Е.М. Сентюрихина, Л.Н. Опарина. - М.: Химия, 1966. - 144 с
5. Гаврилов, К.В. Оценка антифрикционных свойств твердосмазочных покрытий для юбки поршня высокофорсированного дизеля / К.В. Гаврилов, А.В. Морозов, М.В. Селезнев, Ю.В.
6. Гаврилов К. В., Морозов А. В. и др. Оценка антифрикционных свойств твердосмазочных покрытий для юбки поршня высокофорсированного дизеля // Трение и износ. – 2020 – Том 41, №5. – С.647-654.
7. Прудников, М.И. Эффект применения антифрикционных твердосмазочных покрытий для деталей клапанов ТЭС / М.И. Прудников, А.В. Чекмодеев // Трубопроводная арматура и оборудование. – 2017 – №6(93). – С. 78-79.

Information about the paper in English

V.E. Melnikova
LLC Modengy Scientific and Production Center
Bryansk, Russia
E-mail: info@modengy.ru
Receipt date: October 01, 2022

RELEVANCE OF APPLYING ANTI-FRICTION SOLID LUBRICATING COATINGS IN METALLURGY

Abstract

The paper describes the solid lubrication technology and materials used in metallurgical equipment to reduce friction, increase operational life and ensure a long protection against corrosion. It summarizes successful experience of using anti-friction solid lubricating coatings, anti-adhesion coatings and solid lubricant pastes in equipment for cold stamping of metals, casting of metals and alloys, reducing metals, on buckets of robotic complexes to collect hard zinc from the hot dip galvanizing bath, in rolling stands, bearing assemblies of straightening and cutting machines, chain belts of lifting equipment, and buttress threads of cone crushers at metal mining enterprises.

Keywords: reduced friction, reduced wear, friction, wear, anti-friction coating, solid lubricating coating, protection against corrosion, reliability, resource, solid lubricant, dry lubricant, lubricating coating, anti-scuffing paste.



УДК 621.8

**В.Г. Артюх, Н.В. Корихин,
Н.В. Чернышева, И.Н. Чигарева, А.И. Круглов**
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: artiukh@mail.ru
Дата поступления 23.12.2022
В авторской редакции

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ МАШИН И ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАБЛУЖДЕНИЯ, С НЕЙ СВЯЗАННЫЕ

Аннотация

Рассматриваются основные технические заблуждения, вызванные непониманием характера и величин внешних нагрузок, приложенных к деталям машин, а также самого понятия «прочность». Исследуется зависимость коэффициента запаса прочности детали машины от параметров силовой линии, в которую установлена данная деталь. Выясняются отличия проектной и функциональной прочности и пути ее повышения.

Ключевые слова: проектная и функциональная прочность, коэффициент запаса прочности, материал, деталь, машина, сооружение.

Введение

На сегодняшний день, к сожалению, в вопросах исследования (с инженерной точки зрения) прочности материалов и деталей машин накопилось множество технических заблуждений, вызванных как непониманием характера и величин внешних нагрузок, приложенных к деталям машин, так и нечеткостью самого понятия «прочность». Это непонимание особенно сильно у инженеров-механиков, эксплуатирующих металлургическое оборудование, но присутствует также и в среде вузовских преподавателей, готовящих будущих инженеров.

Основная часть

Вопросы классификации и возникновения внешних нагрузок, воздействующих на детали металлургических машин, рассмотрены довольно подробно в работах [1-5]. С понятием «прочность», а точнее, с термином «прочность» мы встречаемся очень часто, как в повседневной практике, так и в специализированной технической литературе [6-9]. Тем не менее, это понятие требует уточнения, ибо под прочностью понимают разные свойства тел или материалов. Ясно, что без четкого определения понятия

прочности нельзя анализировать варианты повышения прочности или определения оптимальной прочности. Нужно разобраться и в том, что является объектом понятия «прочность»: материал, деталь, машина, сооружение – другими словами, прежде всего хотелось бы знать, о прочности чего идет речь [1, 10].

Все мы в свое время учились по классическим советским учебникам металлургического оборудования, например: Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. «Машины и агрегаты металлургических заводов», в 3-х томах; Королев А.А. «Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков». Что же рекомендуют эти учебники при проектировании деталей металлургических машин? «Допустимые напряжения в валках принимают, исходя из пятикратного запаса прочности их». Для шпинделей привода прокатных валков, нажимных винтов также рекомендован пятикратный запас прочности. Для станин клетей прокатных станков рекомендован десятикратный запас прочности.

Результаты такого проектирования мы видим на рисунках 1-4. Поломок не просто много. Их очень много. Чистовая группа клетей непрерывного широкополосного стана (НШС) 1700 комбината Arcelor

Mittal Temirtau – 50 поломок подшипников рабочих валков в месяц. Число поломок во всех клетях черновой и чистовой группы НШС 1700 ПАО «ММК им. Ильича» за 3 года – 261. Убытки одного металлургического комбината за год только от разрушения деталей механического оборудования – миллиарды рублей. Станины клетей про-

катных станов не разрушаются, но пластически деформируются («разбиваются») под наделками, что вызывает необходимость их наплавки и дорогостоящей мехобработки. Все говорит о том, что есть системное непонимание происходящих при нагружении процессов, и простым увеличением коэффициента запаса прочности эту проблему не решить.



а) разрушение бочки валка от изгиба и приводного конца от кручения



б) разрушение лопасти хвостовика валковой муфты от изгиба и сдвига

Рисунок 1. Рабочие валки и валковые муфты НШС 1700 ПАО «ММК им. Ильича»



а) разрушение шпинделя привода рабочих валков по головке (шарнир Гука)



б) «разбивание» и выкрашивание наделок подушек рабочих валков

Рисунок 2. Шпиндель привода и подушка рабочего валка стана 3000 ПАО «ММК им. Ильича»



Рисунок 3. Хобот завалочной машины мартеновского цеха



Рисунок 4. Брехшпиндель пильгерстана 6÷12" (усталостная трещина, косой излом)

Зададим два классических русских вопроса (по Герцену и Чернышевскому): **кто виноват** в сложившейся ситуации, и **что делать** инженерам-механикам?

На вопрос «кто виноват?» существует три ответа:

1. Непонимание того, с какими нагрузками нужно бороться.
2. Понятие «заданные нагрузки».
3. Коэффициент запаса прочности детали = const.

Пункт 1 подробно рассмотрен в монографии [1]. Из спектра всех нагрузок нужно выделить технологические (полезные), которые изменять нельзя, и нетехнологические (паразитные), которые можно и нужно уменьшать путем амортизации.

Пункт 2 не менее подробно рассмотрен в работах [4, 10]. Не существует заранее заданных нагрузок. Есть заданные воздействия. Нагрузки не заданы «свыше», а возникают в самой машине под влиянием этих воздействий. Величина нагрузок всегда зависит от параметров машины - жесткости и энергоемкости. Если мы хотим уменьшить возникающие в системе нагрузки, то мы должны увеличивать энергоемкость (резильянс) этой системы, и уменьшать ее жесткость.

Пункт 3 попытаемся рассмотреть прямо сейчас.

Основные технические заблуждения, порождаемые разными (нечеткими, неточными) определениями прочности:

1. Чем больше деталь, тем она прочнее.
2. Чем прочнее материал детали, тем прочнее сама деталь.
3. Чем прочнее деталь, тем она долговечнее.
4. Динамические нагрузки опаснее статических.

«Чем больше деталь, тем она прочнее». Это практическая реализация народной мудрости «где тонко, там и рвется». Даже в статике такое утверждение верно не всегда. Вавилонская башня рухнула не из-за смещения языков строителей, а от достижения каменной кладкой своей предельной высоты, после чего она разрушается под

действием собственного веса. При увеличении размеров детали (кручение, изгиб) прочность растет пропорционально третьей степени линейного размера (моменты сопротивления: полярный и осевой), а жесткость – пропорционально четвертой степени того же размера (моменты инерции: полярный и осевой). В статически неопределимых системах более жесткие элементы автоматически принимают на себя большую часть нагрузки, т.е. прочность в них зависит от жесткости. Поэтому очень часто «рвется там, где толсто». В динамике от жесткости зависит коэффициент динамичности, и вся дополнительная прочность, полученная нами в статике от увеличения размеров детали, может быть «съедена» возросшим коэффициентом динамичности. Увеличение размеров детали при колебательных процессах влечет за собой увеличение массы и, соответственно, увеличение инерционных нагрузок. Если «где тонко» – это концентратор напряжений (например, проточка или трещина), то в этом месте еще и полностью меняется напряженное состояние материала детали. И таких примеров можно привести великое множество.

«Чем прочнее материал детали, тем прочнее сама деталь». Действительно, если бы такой связи не было, то зачем были бы нужны прочные материалы? Ведь целые коллективы ученых и инженеров создают новые сплавы, полимеры, композитные материалы, а также применяют новые виды их термических и механических обработок – и все для того, чтобы получить еще более прочные материалы, чем те, которые уже применяются. Вместе с тем, практика эксплуатации металлургических машин знает много примеров противоположных, когда изготовление детали из менее прочного материала делает деталь более прочной. Такая деталь выдерживает большую разрушающую нагрузку, а значит, имеет большую прочность.

Различие в том, **что** принято считать мерой прочности. В одних случаях мерой прочности считают предельные напряжения, в других – мерой прочности является предельная разрушающая нагрузка. В чем

главная разница между предельной нагрузкой и предельным напряжением? Предельная нагрузка – величина интегральная, а предельное напряжение – дифференциальная. Соответствие этих величин зависит от первоначального (в упругой стадии работы конструкции) и конечного (предшествующего разрушению) распределения напряжений. Большая прочность **детали** может быть достигнута при меньшей прочности (но более высокой пластичности) **материала**. Это объясняется более равномерным распределением напряжений в предельной стадии нагружения, предшествующей разрушению. Практика эксплуатации некруглых валов металлургических машин (трефовые соединения в приводах прокатных станов) не только полностью подтверждает это, но и указывает реальный путь повышения прочности валов и преодоления сложившихся заблуждений.

«Чем прочнее деталь, тем она долговечнее». Такое утверждение представляется совершенно очевидным, поэтому необъяснимыми кажутся случаи, когда оно оказывается неверным. Рассмотрим пример из практики эксплуатации металлургических машин. На рабочие валки, их подушки и, соответственно, на станины рабочих клеток при захвате металла валками действуют значительные нагрузки горизонтального направления [11]. Результат такого воздействия – «разбивание» станин, подушек и их защитных лицевых планок. Практика эксплуатации указанных узлов и деталей знает много попыток увеличить прочность упомянутых лицевых планок. Подавляющее большинство этих попыток нужно признать неудачными. Несмотря на существенное повышение прочности планок, их долговечность практически не возросла.

Единственной удачной попыткой следует считать применение полимерных планок (например, французских полиэтиленовых планок «Klessim»), срок службы которых на чистовых клетях НШС-1700 ММК им. Ильича достиг 24 мес. по сравнению с 6...10 мес. для различных вариантов стальных планок. Попытка объяснить этот результат показала, что прочность полимерной планки (найденная экспериментальным путем) примерно на порядок меньше,

чем планки стальной. Возникает парадоксальная ситуация, когда слабая деталь оказывается более долговечной, то есть лучше выполняющей свои функции [12-15]. Такая деталь **функционально** является более прочной; именно так трактует прочность и обслуживающий персонал машин.

«Динамические нагрузки опаснее статических». Это утверждение напоминает старый армейский анекдот: «Товарищ прапорщик, что тяжелее – килограмм пуха или килограмм гвоздей?». Если в детали будет достигнуто разрушающее напряжение – она разрушится. И совершенно все равно – было это статическое напряжение или динамическое. Другое дело, что при динамическом воздействии на систему гораздо легче получить большую локальную силу. Ведь в динамике величина генерируемой при внешнем воздействии нагрузки зависит от параметров воспринимающей это воздействие системы (жесткости и энергоемкости). Чем жестче система, тем большую нагрузку мы получим при том же воздействии. Именно поэтому мы бьем по гвоздю молотком, а не просто давим на него.

Амортизация – это изменение параметров упругой системы таким образом, чтобы при неизменном внешнем воздействии в ней возникали нагрузки меньшего уровня (безопасного с точки зрения прочности). Поскольку все металлургическое оборудование выполнено в основном из стали (а это материал очень жесткий), то без специальных методов уменьшения жесткости и увеличения энергоемкости (амортизации) возникающие при динамическом воздействии (т.е. воздействии энергией) нагрузки будут очень большими. Это и создает впечатление какой-то особой опасности именно динамических нагрузок. Осознать это возможно только в случае отказа от понятия «заданные нагрузки» (для всех воздействий, кроме статического) и замены его понятием «возникающие в данной системе нагрузки». Именно «в данной системе», так как системы с различными жесткостью и энергоемкостью будут при **одном и том же** воздействии генерировать совершенно **разные** нагрузки.

Все вышеизложенное требует нового подхода к самому определению прочности.

Сформулируем следующее определение. «**Функциональная прочность** детали (работающей в конкретной машине) – это способность данной детали выполнять свои функции, не разрушаясь». Такое определение кажется логичным и понятным. Правда, не совсем ясно, зачем нужно вводить это новое определение, если старые были похожими.

Дело в том, что предыдущие определения вовсе не были аналогичными данному. Прочность связывалась либо с величиной максимального напряжения, либо со способностью воспринимать нагрузки, не разрушаясь. Теперь она связывается со способностью детали выполнять свои функции, не разрушаясь. На первый взгляд кажется, что второе и третье определения идентичны – в одном случае говорится о способности воспринимать нагрузки, а в другом – о способности детали выполнять свои функции. Ведь при выполнении любых функций детали тоже приходится воспринимать какие-то нагрузки.

Разница становится понятной, если вспомнить, что нагрузки могут быть полезными (технологическими) и вредными (паразитными), с которыми надо бороться. При этом паразитные нагрузки в подавляющем большинстве случаев являются следствием воздействия на машину (или отдельные ее узлы) энергией или деформацией [4]. В этом случае генерируемые нагрузки зависят не только от величины воздействия извне, но и от параметров самой воспринимающей это воздействие системы, т.е. машины. Другими словами, каждая деталь машины участвует в формировании нагрузок, причем некоторые из этих деталей (так называемые «активные детали» [3]) оказывают на уровень паразитных нагрузок весьма существенное влияние. Эти детали отличаются от других повышенной энергоемкостью и малой жесткостью. Замена такой детали другой деталью может изменить энергетические характеристики всего привода, а, следовательно, повлиять на уровень нагрузок в машине.

Когда мы сравниваем прочность двух взаимозаменяемых деталей, работающих поочередно в одной и той же машине, то говорим, что ставим их в равные условия

работы. При этом подразумевается, что равные условия работы означают равные нагрузки на эти детали. Однако такой вариант крайне редок. Так бывает либо при нагружении статической силой, либо в случае, когда заменяемые детали совпадают с новыми деталями по всем энергетическим параметрам – в этом случае генерирование нагрузок в машине и ее узлах происходит так же, как и до замены, и величины нагрузок на сравниваемые детали будут одинаковыми. При этом можно сказать, что функциональная прочность таких деталей равна их проектной прочности.

Если это условие выполняется для всех деталей, которые мы пробуем установить в машине, то эффективность такой машины близка к идеальной. Но в большинстве случаев это не так. Пусть речь идет о таких деталях привода, как муфты (например, муфты привода прокатного стана). Среди них можно выделить несколько типов муфт, которые отличаются друг от друга принципиально, то есть имеют существенно различную рабочую характеристику. Это муфты жесткие, компенсирующие, упругие и т.д. Если подбор муфты для привода будет выполняться только по ее прочности, то получим приводы с муфтами различной функциональной прочности. Это будут приводы с различными нагрузками (при одних и тех же внешних воздействиях). Ярким примером могут служить приводы черновых клетей НШС. Запись нагрузок в приводе свидетельствует о высокой динамичности, а, следовательно, о недостаточной функциональной прочности деталей главной линии. Замена в приводе быстроходного вала с зубчатой муфтой (МЗП) на упругий энергоемкий вал-энергоаккумулятор позволит значительно, в 2...3 раза, уменьшить динамическую (паразитную) составляющую момента в главной линии, и тем самым увеличить функциональную прочность **всех** деталей главной линии [16].

Приведем еще один пример. Горизонтальный удар подушки нижнего рабочего вала о станину черновой клетки толстолистового стана 3000, возникающий при захвате металла прокатными валками.

При замене стальных планок-наделок на полиуретановые произошло изменение функциональной прочности деталей горизонтальной силовой линии:

при $\Delta = 1\text{ мм}$ запас прочности возрастает в $2,6/2,1 = 1,24$ раза;

при $\Delta = 2\text{ мм}$ запас прочности возрастает в $2,8/2,2 = 1,30$ раза;

при $\Delta = 6\text{ мм}$ запас прочности возрастает в $3,5/2,25 = 1,55$ раза,

причем это увеличение наблюдается для **всех** деталей горизонтальной силовой линии.

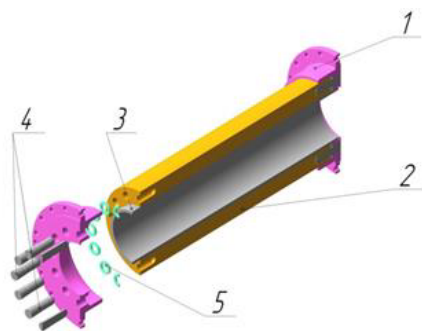


Рисунок 5. Устройство вала-энергоаккумулятора

1 – полумуфта; 2 – полиуретановый упругий элемент; 3 – труба центрирующая; 4 – палец; 5 – гайка

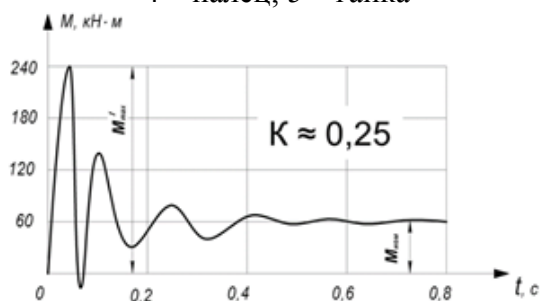


Рисунок 6. Момент сил упругости на быстроходном валу черновой прокатной клетки №4а НШС 1700 ПАО «ММК им. Ильича». Качество силовой линии $K \approx 0,25$

Между проектной и функциональной прочностью нет ни прямой, ни обратной зависимости. В связи с этим возникает вопрос: как определять и в чем измерять функциональную прочность? На первом этапе, при силовом и энергетическом анализе машины, можно оперировать понятием «функциональная прочность» на качественном уровне, рассматривая эффективные пути ее повышения. При этом надо

иметь в виду, что понятие «функциональная прочность» (в отличие от понятия «прочность») относится не к данной детали вообще, а к данной детали, работающей в данной машине и в данном режиме. Это понятие не может существовать вне работающей машины. Отсюда следует, что определенная деталь, обладающая вполне определенной и экспериментально подтвержденной прочностью, может иметь различную функциональную прочность в зависимости от того, куда, в какой привод или упругую систему она установлена. То есть, коэффициент запаса прочности = var. Он равен

$$n_{\phi} = F^*/F_{\max}, \quad (2)$$

где $F^* = \text{const}$ – разрушающая нагрузка для данной детали;

$F_{\max} = \text{var}$ – максимальная нагрузка, действующая на данную деталь в данной машине.

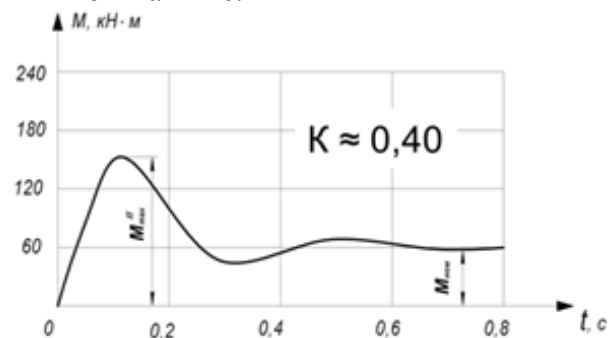


Рисунок 7. Момент сил упругости на быстроходном валу после установки полиуретанового упругого вала-энергоаккумулятора. Качество силовой линии $K \approx 0,4$

Это и есть численное выражение функциональной прочности.

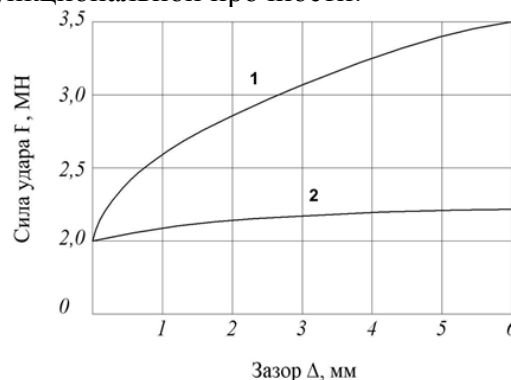


Рисунок 8. Зависимость силы удара от величины зазора: 1 – лицевые планки из стали 45; 2 – лицевые планки из полиуретана adiprene L167

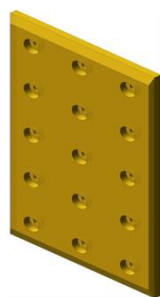


Рисунок 9. Полиуретановая лицевая планка

Таким образом, анализ уровня функциональной прочности деталей в машине поможет более эффективно проектировать и совершенствовать машины, причем мерой такой эффективности может служить различие между проектной и функциональной прочностью, т.е. между коэффициентом запаса прочности детали, определенным при проектировании, и коэффициентом запаса прочности данной детали в данной машине.

Заключение

1. Коэффициент запаса прочности детали машины не является постоянной величиной. Это величина переменная, причем зависит она от параметров силовой линии, в которую установлена данная деталь.
2. Функциональная прочность детали численно представляет собой запас прочности данной детали в данной машине.
3. Понятие «функциональная прочность» и анализ уровня функциональной прочности деталей в машинах поможет более эффективно проектировать и совершенствовать машины, причем мерой такой эффективности может служить различие между проектной и функциональной прочностью.

Исследование частично финансируется Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы Исследовательского центра мирового уровня: Передовые цифровые технологии (соглашение №075-15-2020-311 от 20.04.2022).

Библиографический список

1. Артюх В.Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах: монография / Мариуполь: Изд-во ПГТУ, 2008. 246 с. ISBN 966-604-011-5

2. Эксплуатация и ремонт механического оборудования промышленных предприятий / Кравченко В.М., Ищенко А.А., Артюх В.Г., Сидоров В.А. Запорожье: издатель ФООП Мокшанов В.В., 2021. 316 с. ISBN 978-617-7520-84-8
3. Концепция активной детали в механическом оборудовании / Артюх В.Г., Корихин Н.В., Чернышева Н.В., Чigareва И.Н. // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 24(67). С.81-90.
4. Gharaibeh Nabeel S., Matarneh Mohammed I., Artyukh V.G. Loading Decrease in Metallurgical Machines. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, no.8(12), 1461–1464 (2014).
5. Sorochan E., Artiukh V., Melnikov B., Raimberdiyev T. Mathematical Model of Plates and Strips Rolling for Calculation of Energy Power Parameters and Dynamic Loads. MATEC Web of Conferences, vol.73, 04009 (2016). doi: 10.1051/mateconf/20167304009
6. Mazur V., Artyukh V., Artyukh G., Takadzhi M. Current Views on the Detailed Design of Heavily Loaded Components for Rolling Mills. (2012) Engineering Designer, 2012, V.37, No.1, pp. 26–29.
7. Ischenko A.O., Kravchenko V.M., Dashko O.V., Kakareka D.V. Novie tehnologii vosstanovlenia i zaschiti silovogo oborudovania s pomoschiu kompozitnih materialov [New technologies for restoration and protection of power equipment with the aid of composite materials]. Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, 2017, vol. 60(2), pp. 159–166.
8. Efremov D.B., Gerasimova A.A., Gorbatyuk S.M., Chichenev N.A. Study of kinematics of elastic-plastic deformation for hollow steel shapes used in energy absorption devices. CIS Iron and Steel Review, 2019, no. 18, pp. 30-34. doi: 10.17580/cisisr.2019.02.06
9. Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Sotnikov A.L. Vlianie schem shtampovki zagotovok koles na regimi moschnosti stamповochnogo pressa i na iznos stamповochnogo instrumenta [Influence of wheel billet stamping schemes on power modes

- of forming press operation and on wear of the deformation tool]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya*, 2018, vol. 61(5), pp. 385-392. doi: 10.17073/0368-0797-2018-5-385-392
10. Артюх В.Г. Основы защиты металлургических машин от поломок: монография / Мариуполь: Издат. группа «Университет», 2015. 288с. ISBN 978-617-7295-00-5
 11. Mazur V., Artiukh V., Ishchenko A., Laktionova Y., Zotkina N. Theoretical Calculations and Study of Horizontal Forces Acting on 4-Hi Sheet Stands During Rolling. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 983, pp. 511-521. doi: 10.1007/978-3-030-19868-8_50
 12. Al-Quran Firas M.F., Matarneh M.E., Artukh V.G. Choice of Elastomeric Material for Buffer Devices of Metallurgical Equipment. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, no.4(11), pp. 1585–1589 (2012).
 13. Artiukh V.G., Karlushin S.Yu., Sorochan E.N. Peculiarities of Mechanical Characteristics of Contemporary Polyurethane Elastomers. *Procedia Engineering*, 2015, no.117, pp. 938–944. doi: 10.1016/j.pro-eng.2015.08.180
 14. Artiukh V., Mazur V, Kargin S., Zakharova L. Adapters for metallurgical equipment. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 170, 03028. doi: 10.1051/mateconf/201817003028
 15. Artiukh V.G., Galikhanova E.A., Mazur V.M., Kargin S.B. Energy intensity of parts made from polyurethane elastomers. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, 81(5), pp. 102-115. doi: 10.18720/MCE.81.11
 16. Варианты защиты металлургического оборудования от поломок в условиях импортозамещения и недостаточного финансирования / Артюх В.Г., Корихин Н.В., Чернышева Н.В., Чigareва И.Н. // *Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXII Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 2 / под ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2021. С.225-232.*

Information about the paper in English

V.G. Artyukh, N.V. Korikhin, N.V. Chernysheva, I.N. Chigareva, A.I. Kruglov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Saint Petersburg, Russia

E-mail: artiukh@mail.ru

Receipt date: December 23, 2022

FUNCTIONAL STRENGTH OF MACHINES AND MAIN RELEVANT MISLEADING TECHNICAL BELIEFS

Abstract

The paper describes main misleading technical beliefs resulting from misunderstanding of the nature and values of external loads applied to machine parts, and the concept of strength. There is a study on the dependence between the safety factor of a machine part and force line parameters of such part. The paper identifies differences between design and functional strength and methods used for its increase.

Keywords: design and functional strength, safety factor, materials, part, machine, construction.



Уважаемые коллеги!

Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова приглашает молодых ученых, аспирантов и специалистов принять участие в VII Международной молодежной научно-практической конференции «**Magnitogorsk Rolling Practice 2023**», посвященной вопросам обработки металлов давлением.

Молодежная конференция проводится в формате школы-семинара и включает пленарные лекции известных зарубежных и отечественных ученых и доклады молодых ученых, специализирующихся в области обработки металлов давлением.

Секции конференции:

- Фундаментальные проблемы обработки металлов давлением
- Инновационные технологии и материалы обработки металлов давлением
- Развитие теории и технологий глубокой переработки металлов и сплавов
- Перспективы развития направления интеллектуальной металлургии (iSmart-Metallurgy)

В рамках конференции запланирован конкурс на лучший доклад молодых ученых. Статьи по материалам докладов будут опубликованы в журналах, информационных партнерах конференции. Для участников конференции будет организован индустриальный тур на крупнейшее металлургическое предприятие России – ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Дата проведения: **30 мая -3 июня 2023 г.**

Место проведения: г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38

Участие в конференции бесплатное. Для участия, необходимо зарегистрироваться на сайте <http://mrp.magtu.ru> и прислать тезисы доклада на почту magstu.international@gmail.com с указанием в теме письма «MRP-2023» до 10 мая 2023г. Рабочие языки конференции: русский и английский.

Информационные партнеры конференции:

- ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации;
- Теория и технология металлургического производства;
- Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова;
- Механическое оборудование металлургических заводов.

Контактная информация: телефон +7(3519)22-04-67

Официальный сайт конференции: <http://mrp.magtu.ru>

E-mail конференции: magstu.international@gmail.com

Телеграмм – канал: t.me/MRPmgn

ТРЕБОВАНИЯ

к оформлению материалов представляемых для публикации

1. Материалы предоставляются в электронном виде, оформленные в программе MS Word 97-2003.
2. Объем представленных материалов должен быть не менее 6-ти страниц (в режиме оформления одной колонкой на листах формата А4), включая рисунки и таблицы.
3. Формат листа: А4 (210х297 мм).
4. Межстрочный интервал: одинарный.
5. Размер полей слева, справа и сверху страницы 18 мм, снизу 20 мм.
6. Нумерация страниц осуществляется внизу по центру страницы.
7. Шрифт текста: Times New Roman, размер 12 пт.
8. Отступ перед каждым абзацем (красная строка) – 10 мм.
9. Формулы должны быть набраны в тексте, вписывание формул от руки не допускается, размер базового шрифта в формулах – 12 пунктов.
10. Рисунки должны быть вставлены в текст и обязательно представлены в виде отдельного файла в формате jpeg, tiff, bmp с разрешением не менее 300 dpi. Наличие подрисовочной надписи обязательно.
11. Не допускается разрыв таблиц, рисунков, заголовков при переходе со страницы на страницу.
12. Структура текста.
 - 12.1. Индекс УДК.
 - 12.2. Имя, отчество и фамилия авторов, жирный шрифт – Times New Roman, размер – 12 пт.
 - 12.3. Наименование организации.
 - 12.4. Город, страна.
 - 12.5. Контактный адрес электронной почты (E-mail).
 - 12.6. Название (должно быть набрано прописными буквами не в режиме CAPS LOCK (SHIFT)).
 - 12.7. Аннотация (объем не менее 100 слов).
 - 12.8. Ключевые слова (не менее 8 слов).
 - 12.9. Введение.
 - 12.10. Основная часть.
 - 12.11. Заключение (Выводы).
 - 12.12. Библиографический список.
13. Библиографический список составляется в последовательности ссылок в тексте. В тексте статьи ссылки на литературный источник заключаются в квадратные скобки. Библиографическое описание регламентировано ГОСТ 7.05-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Материалы для публикации направлять по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова, кафедра «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования».

Контактные телефоны: (3519) 29-85-07, 29-84-51.

E-mail: momz-magtu@yandex.ru, momz-magtu@mail.ru с указанием темы электронного письма «Журнал МОМЗ».

Сайт журнала: www.momz.magtu.ru

Контактное лицо, отв. редактор к.т.н. Слободянский Михаил Геннадьевич.


ПРАЙС-ЛИСТ

на размещение рекламы в журнале
«Механическое оборудование металлургических заводов»

№ п/п	Цветная реклама на обложке издания		Черно-белые внутренние полосы	
	Объем	Цена, руб	Объем	Цена, руб
1	2-ая полоса (формат А4)	8000	1 полоса	6000
2	3-ая полоса (формат А4)	8000	½ полосы	4000
3	4-ая полоса (формат А4)	10000	¼ полосы	2000

Статья рекламного содержания		Реклама на сайте издания			
Объем	Цена, руб	Место расположения рекламного контента	Объем / размер	Срок размещения	Цена, руб
1 полоса	3000	Слайдер на главной странице (изображение)	700 x 380 pixels	1-6 месяцев	4000
				6-12 месяцев	6000

Пример оформления рекламного изображения в слайдере на главной странице сайта издания



- Главная
- О журнале
- Автору
- Архив
- Редакция
- Партнеры
- Контакты

Журнал "Механическое оборудование металлургических заводов"

Журнал "Механическое оборудование металлургических заводов" является бесплатным изданием открытого доступа.



700 x 380 pixels

Журнал "Механическое оборудование металлургических заводов" является информационным партнером XIV-го международного конгресса сталеплавателей

Научно-технический журнал MOM3

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. ГИ. Носова» приглашает Вас опубликовать результаты Ваших научных исследований в журнале «Механическое оборудование металлургических заводов». Журнал «МOM3» включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и ему присвоен международный стандартный номер сериального издания ISSN 2311-1364. Сведения о журнале