



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 31.07.2019. Заказ 229.
Тираж 300 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

В.С. Некипелов, А.В. Шикин Основы расчета процессов формирования витков проката и промышленные испытания инновационных процессов намотки	4
А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, П.В. Макарова, Ю.С. Ляшева Оценка и обеспечение эффективности функционирования основного оборудования широкополосных станов	15
А.В. Алифанов, В.Н. Алехнович, А.М. Милукова, А.И. Михлюк, О.А. Толкачева Исследование влияния режимов плазменной наплавки с использованием постоянно-импульсной плазмы на качество нанесенных покрытий	25
С.Я. Березин Исследования пластических свойств цветных сплавов применительно к процессам резьбовыдавливания	33
В.В. Точилкин, О.А. Филатова Конструкции элементов систем распределения потоков стали, модернизируемых промежуточных ковшей МНЛЗ	41
И.В. Горлов, Е.В. Полетаева Структурная модель детали – основа синтеза технологического процесса	45
Л.С. Белевский, Р.Р. Дема, М.А. Леванцевич, Е.В. Пилипчук, Е.Л. Юрты Упрочнение поверхности и нанесение функциональных покрытий вращающимися проволочными щетками	53
А.В. Заболотский, М.Ю. Турчин, А.О. Мигашкин, В.Т. Хадыев Численное моделирование коэффициентов интенсивности напряжений для пространственной системы дефектов на примере периклазоуглеродистого огнеупора сталеплавленного производства	64
И.Е. Илларионов, Д.А. Пестряев, Ш.В. Садетдинов, И.А. Стрельников Разработка боратфосфатных моющих средств для очистки деталей металлургических машин в ремонтном производстве	71
Г.И. Трифонов Исследование зависимости теплофизических и физико-механических параметров плазменного напыления от скорости перемещения плазматрона	76
С.В. Самусев, В.А. Фадеев Конструкция трубозлектросварочного агрегата 30-50 и определение кинематических и силовых параметров процесса формовки прямошовных сварных труб	81
М.П. Шишкарёв Синтез адаптивной фрикционной муфты со смешанной обратной связью параллельного действия	89
Е.С. Решетникова, Е.А. Свистунова В.О. Широков, Ю.А. Гудаева История и перспективы развития компетенции Инженерный дизайн CAD (САПР) по стандартам WorldSkills в МГТУ им. Г.И. Носова	103

CONTENTS

V.S. Nekipelov, A.V. Shikin Coiling process design basics and pilot testing of innovative coiling processes	4
A.V. Antsupov (Jr), A.V. Antsupov, V.P. Antsupov, P.V. Makarova, Yu.S. Lysheva Analysing and ensuring the efficiency of the main components of a wide-strip mill	15
A.V. Alifanov, V.N. Alekhnovich, A.M. Milyukova, A.I. Mikhlyuk, O.A. Tolkacheva Understanding the relationship between the continuous/pulse plasma coating modes applied and the quality of resultant coatings	25
S.Ya. Berezin Understanding the plastic properties of non-ferrous alloys in thread forming	33
V.V. Tochilkin, O.A. Filatova Design of steel distribution system components in retrofitted continuous caster tundish ladles	41
I.V. Gorlov, E.V. Poletaeva Structural model of a part as the basis for process synthesis	45
L.S. Belevskiy, R.R. Dema, M.A. Levantsevich, E.V. Pilipchuk, E.L. Yurut Surface hardening and functional coatings installed by rotating wire brushes	53
A.V. Zabolotskiy, M.Yu. Turchin, A.O. Migashkin, V.T. Khadyev Numerical modelling of stress intensity factors for spatial defects: The case study of periclase-carbonaceous refractory material used in steelmaking	64
I.E. Illarionov, D.A. Pestryaev, Sh.V. Sadetdinov, I.A. Strelnikov Developing borate-phosphate detergents for cleaning metallurgical equipment as part of the maintenance scope	71
G.I. Trifonov Understanding the relationship between the thermophysical and physico-mechanical parameters of plasma spraying and the travel rate of the plasmatron	76
S.V. Samusev, V.A. Fadeev Design of the ERW pipe mill 30-50 and definition of the kinematic parameters and forces involved in the production of LSAW pipes	81
M.P. Shishkarev Synthesis of a self-adjusting combination feedback friction clutch of parallel action	89
E.S. Reshetnikova, E.A. Svistunova, V.O. Shirokov, Yu.A. Gudaeva History and prospects of the WorldSkills Engineer's CAD Design at NMSTU	103



Информационная справка к 85-летию университета

Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова – опорный вуз Южного Урала, уверенно перешагнувший 85-летний рубеж. Университет, известен как многопрофильный научно-образовательный центр с широкой географией творческих и научных связей с ведущими российскими и зарубежными вузами. Вуз удостоен государственной награды – ордена Трудового Красного Знамени и благодарности Президента Российской Федерации.

В МГТУ им. Г.И. Носова обучается около 14 000 студентов по 328 техническим и гуманитарным направлениям высшего и среднего профессионального образования. Действует 6 докторских диссертационных советов по 11 научным специальностям, работают 106 докторов наук и 502 кандидата наук. Одиннадцать образовательных программ удостоены первого места в номинации «Лучшие образовательные программы инновационной России».

На базе вуза действует 4 научно-исследовательских института: Наносталей, Metallургических технологий и обработки материалов давлением, Комплексного освоения георесурсов, Исторической антропологии и филологии, R&D-центр, осуществляющий разработки в направлении Индустрии 4.0. За последние годы 7 проектов университета получили право на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств и государственной поддержки научных исследований по постановлениям Правительства РФ № 218 и №220. Научные коллективы и молодые исследователи ежегодно становятся победителями в конкурсах грантов Президента РФ, Российского научного фонда и Российского фонда фундаментальных исследований. На базе университета создан детский технопарк «Кванториум», «Проектная школа», институт дополнительного образования и кадрового инжиниринга «Горизонт».

Университет активно сотрудничает со стратегическим партнёром в области подготовки кадров и проведения совместных научных исследований ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», а также с другими ведущими предприятиями региона и страны.

Университет принимает активное участие в программах Европейского Союза по поддержке научных и образовательных проектов: Horizon 2020, Erasmus+.Credit mobility и Erasmus+.Capacity Building. В вузе реализуются программы студенческого обмена с университетами Италии, Франции, Чехии, Сербии, Германии, Болгарии и Китая. По оценкам ведущего мирового рейтингового агентства QS университет входит в TOP-350 рейтинга лучших университетов стран БРИКС.

Выпускники МГТУ им. Г.И. Носова работают во всех регионах страны и за рубежом. Среди выпускников – руководители министерств, крупнейших горно-металлургических, машиностроительных и химических предприятий и компаний, депутаты Законодательного собрания и Государственной думы РФ, лауреаты Премии правительства России.

Коллектив Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова продолжает и приумножает лучшие традиции вузов России.



УДК 621.771.068

В.С. Некипелов, А.В. Шикин
АО «НПК «Взрывобезопасность», г. Москва,
г. Москва, Россия
E-mail: vnekipelov@bk.ru
Дата поступления 20.05.2019

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ВИТКОВ ПРОКАТА И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НАМОТКИ

Аннотация

Разработаны основы теоретических расчетов процессов намотки проката, как известных, так и вновь создаваемых. Введены понятия «технологический критерий» процесса намотки и «зона формирования витка». Технологический критерий характеризует связь и соотношение между основными технологически значимыми параметрами процесса намотки и позволяет энергетически оценивать процесс виткообразования по каждому профилю из сортамента, а также возможности расширения сортамента для каждого типа намоточных устройств.

Критерий позволяет конструкторам, не прибегая к сложным математическим расчетам, на стадии проектирования определять требования к машинам, а также состав комплекса оборудования на участках намотки прокатных станов.

Промышленные испытания теоретически разработанных инновационных процессов, применяемых в таком оборудовании, например, как виткообразователи и трайб-аппараты, показали их работоспособность и высокую надежность, позволяющие производить намотку проката ранее невозможную на известных типах устройств.

Ключевые слова: намотка, виткообразование, моталка, виткообразователь, трайб-аппарат, термоупрочнение, катанка, арматура

Введение

В последние годы, наблюдается устойчивая тенденция к росту скоростей прокатки и массы заготовок [1, 2]. Это обеспечивает рост производительности и снижение затрат, как при производстве, так и у потребителя [3]. В бунтах получают стальную катанку [3] и катанку из цветных металлов и сплавов [4], мелкий сорт [4], лист [5], полосы и ленты [5-7], а также трубы [8]. От качества формирования витков зависит и качество самого проката, поскольку намоточное оборудование непосредственно участвует в технологии производства [9]. Таким образом, намоточные и виткообразующие машины играют роль не только оборудования, позволяющего получать продукт в компактном виде, но и обеспечивающего технологию получения заданного качества. При этом ранее оборудование для намотки проката рассматривалось лишь как адьюстаж [5,6].

Возросшие скорости прокатки, что особенно характерно для проволочных прокатных станов [10] (декларируемые компаниями рекордные скорости прокатки достигают до 140 м/с и масса заготовок до 3...3,5 тонн), а также строительство станов непрерывной прокатки – диктуют необходимость снижения потерь, связанных с аварийными и профилактическими простоями [3,11], требует высокой надежности всего оборудования прокатного стана [12]. Поскольку бунты формируют непосредственно в линии стана, надежность работы оборудования участка виткообразования во многом определяет надежность работы прокатного стана в целом.

Намотка получаемого металлического продукта может применяться и в различных других типах производственных линий, причем скорости производства могут быть достаточно высокими. Для линий производства аморфных металлических лент они, например, могут составлять до 45 м/с [13]. Интересует производителей и

возможность формирования витков для целей их термообработки на конвейере в линиях волочильных станов.

Сказанное выше показывает обоснованность рассмотрения намоточных и виткообразующих машин в качестве основного технологического оборудования, надежность работы и технологические возможности которого определяют качество, сортament и производительность прокатного стана.

Классифицировать указанные машины удобно по основному признаку – условию подачи проката в устройство. В соответствии с этим, существуют два больших класса таких машин. Существуют также различные комбинированные, а также машины других типов [14,15], однако, применение их весьма ограничено.

Отличительный признак первого класса – тангенциальная подача проката на вращаемое приемное устройство (барабан). В свою очередь, этот класс подразделяется на две группы:

- машины, в которых прокат наматывают во внутреннюю полость барабана (моталки типа Гаррета [4]);
- машины, в которых прокат наматывается на наружную поверхность барабана (шпульные моталки [6]).

В этих устройствах собираемый бунт вращается совместно с барабаном моталки.

Отличительный признак второго класса машин – подача проката вдоль оси вращения моталки. Сформированный бунт и/или каждый отдельный виток неподвижны относительно земли. Этот класс также можно подразделить на две группы:

- машины, формирующие целиком бунт (моталки типа Эденборна [4]);
- машины, формирующие спираль отдельных витков проката с укладкой на конвейер (виткообразователи типа Эденборна [3]).

Основы расчета

Сегодня существует настоятельная потребность в реконструкции без изъятия старого оборудования, оптимизации его работы, направленные на расширение сортамента, повышение качества намотки, полу-

чения компактных бунтов, повышения равномерности свойств проката по его длине [9], обеспечения качества концевых витков, сокращения плановых и неплановых простоев и т.д.

Семейство намоточных машин разнообразно, однако, до сих пор отсутствовала единая методика, позволяющая оптимальным образом рассчитывать и подбирать необходимую технологию намотки и оборудование, чтобы обеспечить все требования производства. В классических работах, как правило, рассматриваются частные случаи намоточного оборудования и решаются частные задачи [4,16,17,18].

Для решения этой задачи и была разработана методика расчета всех параметров процесса намотки проката для всех основных типов намоточных устройств. Данная методика по созданной математической модели позволяет рассчитывать все технологические параметры процесса намотки, определять применимость того или иного процесса намотки для конкретного производства, а также проводить экспериментальное масштабное моделирование таких процессов [19,20,21]. В настоящей статье методика расчета не приводится ввиду того, что она имеет в большей степени академическое, а не прикладное значение и несет большой объем вычислений. Наибольшее значение для проектирования конструкций машин имеет «технологический критерий», понятие которого вводится ниже.

Расчётные схемы представлены на рисунке 1. Здесь dF_r – вектор равнодействующей силы, dF_e – вектор переносной силы инерции, dF_k – вектор кориолисовой силы инерции, dT – вектор силы натяжения, $dF_{и}$ – вектор силы сопротивления изгибу, dN – вектор реактивной силы, dF_T – вектор силы трения.

Общее уравнение движения проката в зоне формирования витка для всех типов намоточных устройств в векторном виде будет иметь вид:

$$dF_r = dF_e + dF_k + dT + dF_{и} + dN + dF_T \quad (1)$$

Под «зоной формирования витка» понимается траектория движения проката от начала его пластического деформирования

в виток до полностью сформированного витка. Введено также понятие «технологического критерия» процессов намотки и формула для расчета его значения, позволяющего на стадии проектирования оборудования определять возможность намотки каждого профиля по сортаменту и проектировать оборудование с учетом особенностей профиля, его прочностных характеристик, скорости прокатки.

Технологическим критерием k является соотношение между кинетической энергией проката и работой, необходимой на его деформацию в виток:

$$k = A_k / A_u, \quad (2)$$

A_k – кинетическая энергия проката,

A_u – работа, необходимая для деформации проката в виток.

Для катанки, например, наматываемой на устройствах типа Эденборна, это выражение имеет вид:

$$k = 2,353\gamma \frac{V^2 R}{d \cdot \sigma_T}, \quad (3)$$

где γ – плотность материала проката;

d – диаметр проката;

V – скорость прокатки;

R – радиус формируемых витков;

σ_T – напряжение текучести металла при температуре намотки.

Для других типов устройств легко определить значение k по выражению (2).

Таким образом, величина k характеризует связь и соотношение между основными технологически значимыми параметрами процесса намотки и действительно может рассматриваться как технологический критерий процесса намотки/формирования витков. Эта же величина также может быть использована как критерий подобия при моделировании.

Очевидно, что при значениях $k > 1$ кинетической энергии проката будет достаточно для пластического деформирования его в виток. При этом не требуется никакого дополнительного силового воздействия на прокат в зоне формирования витка, например, воздействия механического.

В случае $k < 1$ для формирования витков требуется дополнительное силовое воздействие. Дополнительный силовой фактор

может быть приложен к прокату в виде распределенной нагрузки в зоне формирования витка, как, например, в виткоформирующих проводках машин типа Эденборна, а также сосредоточенной нагрузкой на границе этой зоны. Для последнего случая – растягивающей нагрузкой, как, например, в шпульных моталках; сжимающей и изгибающей нагрузкой, как на моталках типа Гаррета; или же прокат должен быть предварительно изогнут в подающей проводке.

Кроме того, для моталок с осевой подачей, в прокате могут быть созданы крутящие напряжения, превышающие крутящие напряжения от скручивания проката в моталке и направленные в противоположную сторону, о чем будет сказано ниже.

Влияние параметров процесса на траекторию движения проката в зоне формирования витка

Расчеты процесса виткообразования по математической модели показали, что изменение любого из параметров процесса – размера проката, прочностных характеристик материала, скорости прокатки ведет к изменению траектории движения в зоне формирования витка. Аналогично ведет себя прокат на устройствах типа Гаррета. Для шпульных устройств, при гарантированном положительном натяжении проката, траектория практически прямолинейна.

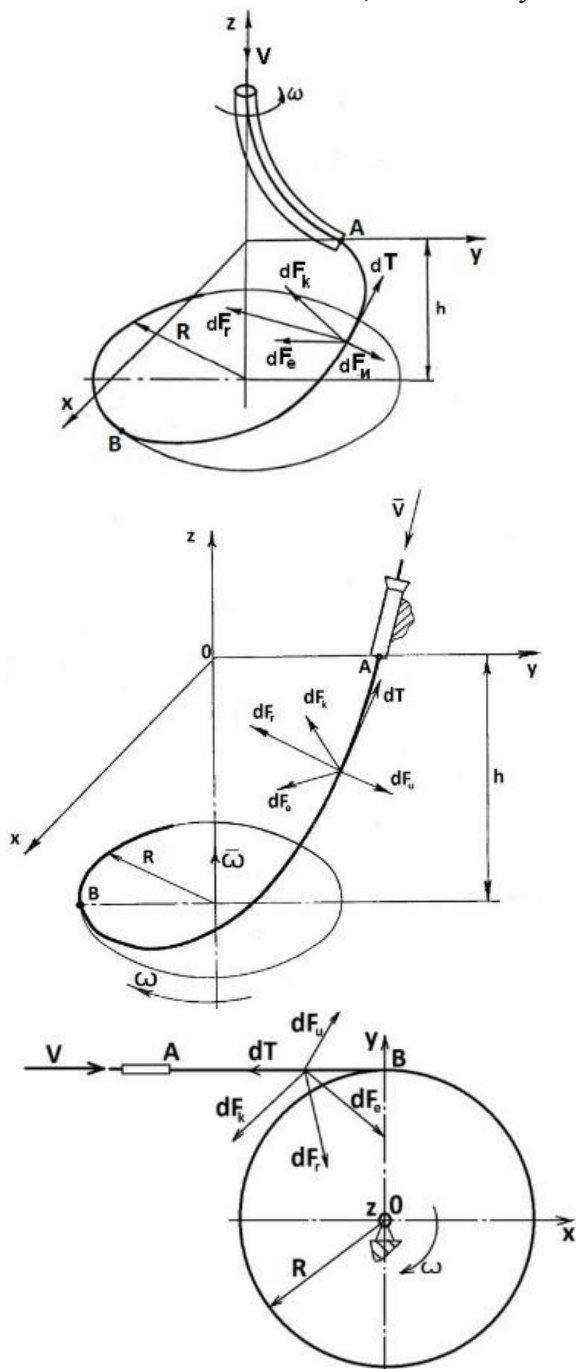
Для устройств с осевой подачей проката это наглядно демонстрируют расчетные кривые траектории его движения в зоне формирования витка (рисунки 2 – 4). Поскольку форма виткоформирующей проводки для машин типа Эденборна должна строиться на основе траектории проката, данный факт показывает невозможность создания унифицированной проводки для всего сортамента. К тому же невозможно учесть все изменения и колебания параметров – скорости прокатки, температуры и размеров проката в процессе производства. А поскольку сортамент проволочных прокатных станов достаточно широк, создание парка таких проводок для каждого прокатываемого материала и типоразмера просто экономически нецелесообразно. Следова-

тельно, такой метод виткообразования рационально применять при относительно невысоких скоростях, когда влияние инерционных (динамических) сил незначительно.

Промышленные испытания

Как было сказано, при достаточно высоких скоростях проката, что достижимо на машинах с осевой подачей, витки могут

формироваться без механического воздействия за счет лишь накопленной кинетической энергии, под действием инерционных (динамических) сил. Таким образом, влияние динамических сил, которое негативно сказывается на процессе в существующих конструкциях виткообразователей, будет использовано для достижения положительной цели.



а) неинерциальная система координат, вращающаяся с угловой скоростью ω

б) инерциальная система координат, неподвижная относительно земли

в) инерциальная система координат, неподвижная относительно земли

Рисунок 1. Расчетные схемы процесса формирования витка: а) устройства с осевой подачей, б) устройства типа Гаррета, в) шпульные устройства. Область, ограниченная точками АВ – зона формирования витка, h – высота зоны формирования витка, R – радиус формируемых витков, V – линейная скорость проката (скорость прокатки), ω – угловая скорость вращения проводки или барабана моталки

Такой процесс является принципиально новым [22] и может быть условно назван процессом виткообразования под действием инерционных или динамических сил. Реализуется такой процесс с помощью виткоформирующей головки специальной конструкции. Варианты таких конструкций представлены на рисунке 5.

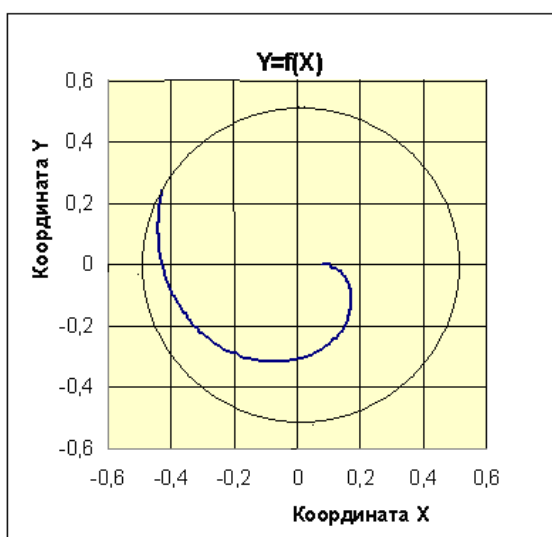
Следующей проблемой, над которой долгое время работали конструкторы и технологи [23,24], является намотка тяжелых (более №10) арматурных термоупрочненных профилей класса 500 и выше на виткообразователях проволочных станов. Здесь возникали две сложности: криволинейная виткоформирующая труба типа Эденборна общей длиной до 4000 мм создает повышенное сопротивление движению жесткого проката, что может приводить к его застреванию внутри трубы и остановке процесса; вторая сложность – остаточные упругие напряжения кручения в витках проката, которые препятствуют его нормальной укладке на конвейер после виткообразователя.

Согласно нашим работам первая сложность решается применением процесса виткообразования под действием инерционных или динамических сил, где

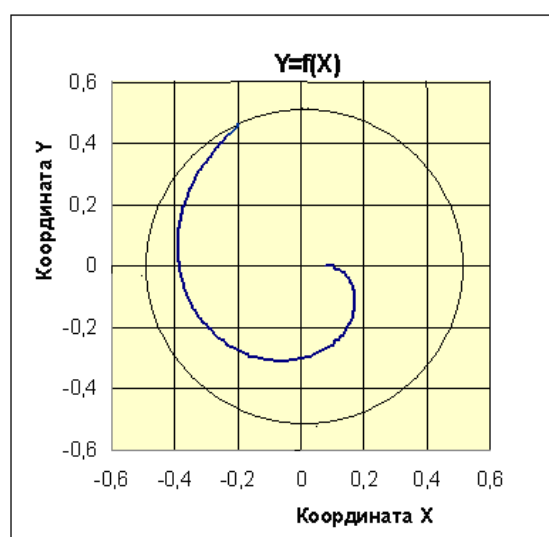
используется короткая 500-600 мм длиной виткоформирующая проводка, вторая – специальной конструкции трайб-аппаратом с возможностью перекоса роликов [25].

Поскольку методика расчетов и обе вышеуказанные разработки являлись инновационными, требовалось их экспериментальное подтверждение, что наилучшим образом обеспечивают промышленные испытания.

Технология формирования витков действием инерционных (динамических) сил предполагает значительное повышение надежности и расширение технологических возможностей виткообразователей проволочных прокатных станов, как для существующих станов, так и для новых со скоростями прокатки до 120 м/с и выше. Виткоформирующая головка новой конструкции имеет консольный вылет не более 300 мм и массу до 35 кг, не требует динамической балансировки, позволяет значительно снизить сопротивление движению проката в виткоформирующей трубе, дает возможность формировать витки переменного диаметра для образования компактного бунта и улучшения условий охлаждения витков на конвейере и многое другое.

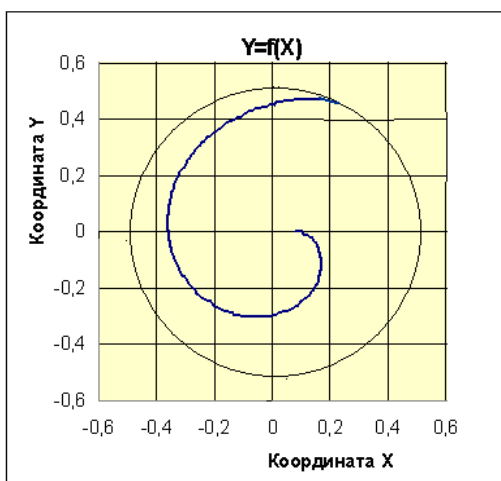


Скорость прокатки $V = 45$ м/с

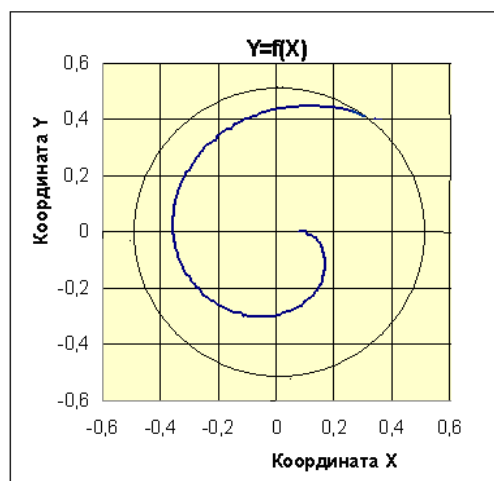


Скорость прокатки $V = 52$ м/с

Рисунок 2. Изменение траектория движения проката №10мм с пределом текучести 300 МПа при изменении скорости прокатки

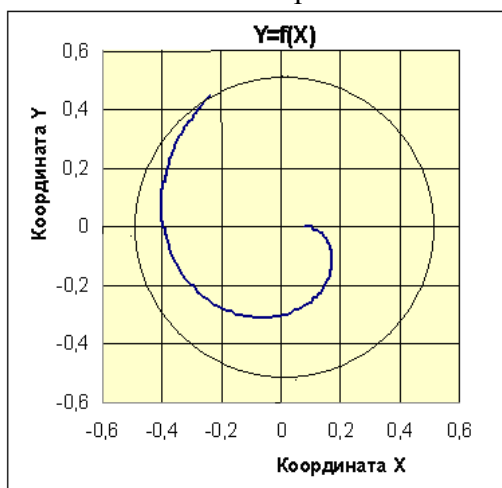


Предел текучести 300 МПа

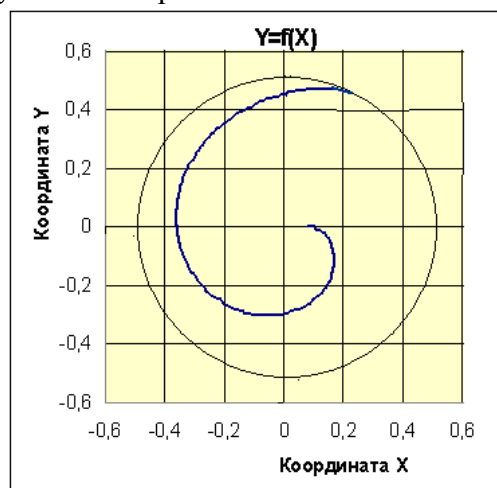


Предел текучести 150 МПа

Рисунок 3. Изменение траектория движения проката №7мм со скоростью прокатки 100 м/с при изменении предела текучести материала

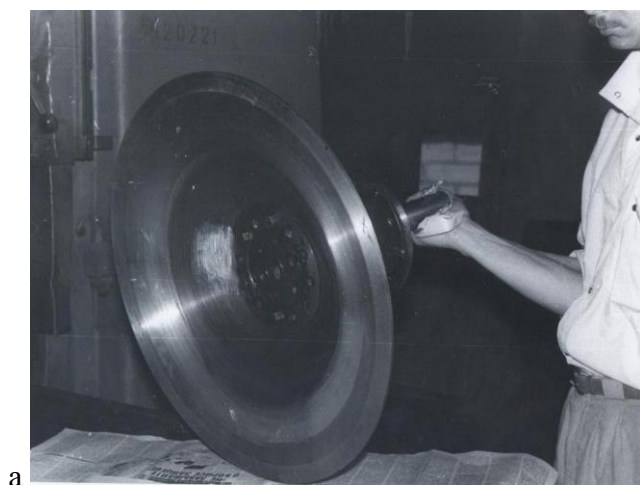


Диаметр проката $\Phi 7$ мм



Диаметр проката $\Phi 5,5$ мм

Рисунок 4. Изменение траектории движения проката со скоростью прокатки 100 м/с с пределом текучести материала 300 МПа при изменении диаметра проката



а



б

Рисунок 5. Примеры различных модификаций конструкции виткоформирующей головки

Испытания данной технологии были проведены на стане 150 ЧерМК (г.Череповец) при скоростях прокатки до 60 м/с (рисунок 6), а также на стане 150 ММЗ (г.Рыбница) при скоростях до 102 м/с (рисунок 7).

С помощью расчетов по формуле (3) были рассчитаны критерии k (в таблице 1 представлены некоторые предельные значения k), слева и справа от косой черты – для проката с пределом текучести при температуре намотки 40 и 300 МПа соответственно.

Как видно из таблицы, величина критерия k при скоростях прокатки до 60

м/с для профилей №10, 11 и 12 с пределом текучести 300 МПа - менее 1, что явно недостаточно для качественного формирования и укладки витков на конвейер. Испытания на проволочном прокатном стане 150 ЧерМК полностью подтвердили это. Остальные профили формировались в витки и укладывались качественно. Была подтверждена также и точность методики расчета процесса формирования витка (рисунок 8) совпадением расчетной и реальной траектории движения проката. Была показана и возможность формирования витков переменного диаметра (рисунок 6).

Таблица 1

Значения технологического критерия для различных профилей с различными прочностными характеристиками, прокатываемых с разными скоростями

Диаметр катанки, мм	5,5	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
k для стана 150 ЧерМК при скоростях до 60 м/с	114/12	105/10	48/3,6	25/1,9	13/1,0	12/0,8	11/0,6	10/0,4
k для стана 150 ММЗ при скоростях до 100 м/с	420/56	271/36	122/16	63/8,5	35/4,6	20/2,7	13/1,7	8/1,1

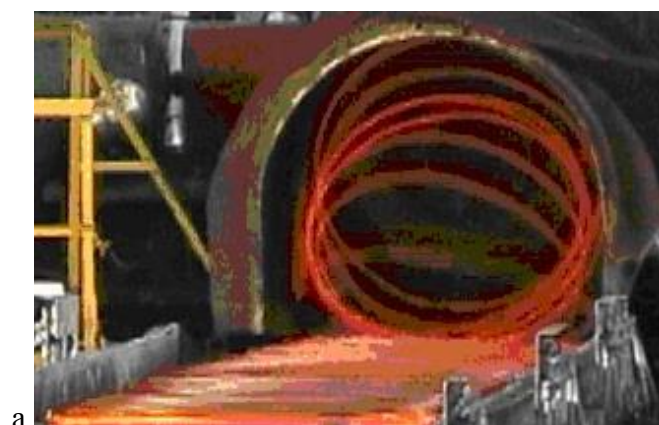
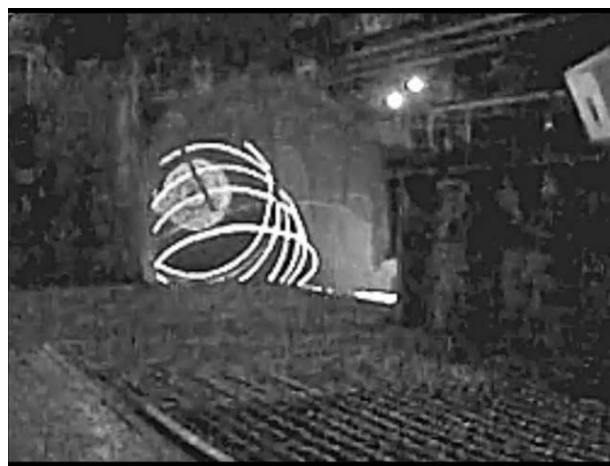


Рисунок 6. Фото промышленных испытаний при скоростях прокатки до 60 м/с: а – намотка горячего проката, б – формирование витков переменного диаметра

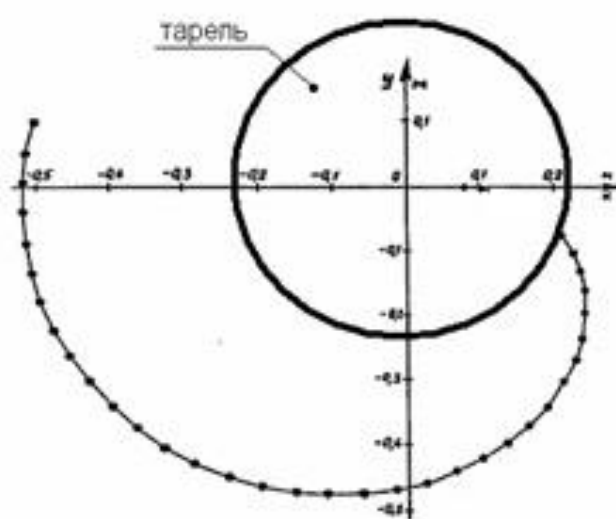


а



б

Рисунок 7. Фото промышленных испытаний при скоростях прокатки до 102 м/с



а



б

Рисунок 8. Совпадение расчетной (а) траектории проката в зоне формирования витка с реальной (б) траекторией (фотофиксация)

Технология намотки термоупрочненного арматурного проката. В формировании витков проката, помимо собственно наматывающего оборудования (моталки или виткообразователя) участвует также и трайб-аппарат. Как было сказано выше, при высоких значениях предела текучести материала проката (свыше 250...300 МПа) при температуре намотки остаточные упругие крутящие напряжения препятствуют качественной укладке витков на конвейер (рисунок 9).



Рисунок 9. Существующая технология. Негативное влияние остаточных упругих напряжений кручения в прокате на укладку витков (арматурная сталь №10 класса А500)

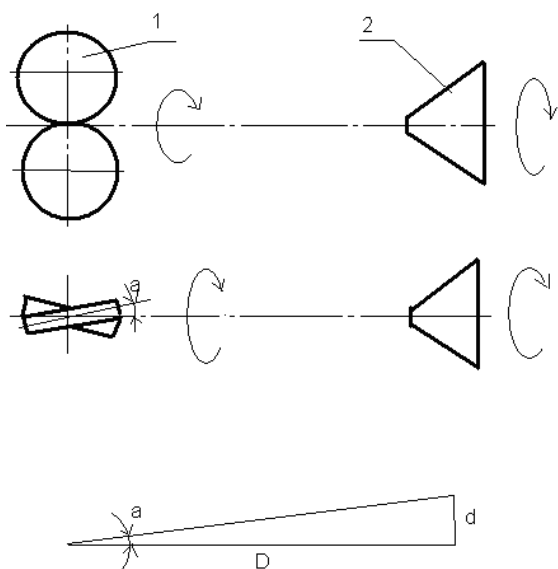


Рисунок 10. Схема работы трайб-аппарата для разгрузки катанки от скручивающих нагрузок на участке «трайб-аппарат – виткообразователь» (от напряжений кручения): 1 – ролики трайб-аппарата, 2 – виткообразователь, α – угол перекоса ролика

Для того, чтобы в витках при их формировании на виткообразователях не появлялось крутящих напряжений, каждое сечение проката в процессе намотки должно поворачиваться вокруг своей продольной оси на тот же угол, на который оно поворачивается в виткообразователе. Обеспечить это может трайб-аппарат с возможностью перекоса осей роликов на необходимые углы. Принципиальная схема роликов такого трайб-аппарата приведена на рисунке.10.

Перед началом прокатки ролики перекашивают на угол α , определяемый для каждого диаметра проката из сортамента по формуле [25]:

$$\alpha = \arctg (d / D), \quad (4)$$

где α – угол установки перекоса ролика,
 d – диаметр катанки,
 D – диаметр витка.

При работе трайб-аппарата по этой схеме, упругопластические деформации кручения в катанке переносятся с участка «трайб-аппарат – виткообразователь» на участок «система водо-воздушного охлаждения – трайб-аппарат» и полностью разгружают виткообразователь от работы по

скручиванию проката. При этом витки будут качественно укладываться на конвейер (рисунок 11).

Кроме этого, как было упомянуто выше, такое конструктивное решение трайб-аппарата может применяться и для формирования витков проката при значениях технологического критерия $k < 1$. В этом случае угол перекоса роликов трайб-аппарата должен устанавливаться исходя из соотношения:

$$\alpha > \arctg (d / D). \quad (5)$$



Рисунок 11. Новая технология. Качественная укладка термоупрочненной арматурной стали №10 класса А500 при оптимальном угле перекоса роликов трайб-аппарата

Тогда прокат будет выходить из моталки или виткообразователя с крутящими напряжениями, сворачивающими его в виток. Заданный диаметр витков можно получать варьируя углом перекоса роликов α , а также соотношением скоростей прокатки и намотки. Расчет необходимого угла перекоса роликов не представляет трудностей и может быть выполнен, например, на основе методики, изложенной в [26] для расчета пружин или аналогичным ей.

Выводы

Разработаны основы теории и методика расчета процессов намотки проката, позволяющие как рассчитывать основные технологические параметры всех известных процессов намотки, так и разрабатывать новые процессы и оборудование. Введено понятие «технологического критерия» процесса намотки и приведена формула для его расчета. На основе теории разработаны принципиально новые технологические

процессы намотки для виткообразователей проволочных прокатных станов.

Технологический критерий процесса намотки позволяет на стадии проектирования оборудования или стадии технологического планирования расширения сортамента действующего оборудования определять возможность намотки и корректировать состав оборудования для этой цели.

Методика расчетов подтверждена экспериментально в линиях действующих станов. Новые процессы намотки прошли промышленные испытания, подтвердив свою надежность и расширенные технологические возможности. Они позволяют производить как намотку горячего проката при скоростях прокатки до 100 м/с и выше, так и намотку термоупрочненного арматурного профиля класса 500 и выше.

Библиографический список

1. Top wire rod mill performances at MMK, Russia // Danieli News n.147 New Edition September 2006, Danieli Group, p.46
2. Vibration-free wire rod coiling at speeds above 100 mps.// Danieli News n.147 New Edition September 2006, Danieli Group, p.42
3. Высокоскоростная прокатка катанки / Кугушин А.А., Попов Ю.А. М.: Металлургия, 1982. 144 с.
4. Новые проволочные и сортовые моталки современных станов и установок непрерывного литья и прокатки металлов / Акатов А.И., Ротов И.С., Тепляков Б.В.// Труды института. Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения им. Акад. А.И.Целикова. 1979. Вып. 60. С.107-115.
5. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов: Учебник для вузов / Королев А.А.: 4-е изд., М.: Металлургия. 1987. 480 с.
6. Машины и агрегаты для производства и отделки проката: Машины и агрегаты металлургических заводов. Т.3. / Целиков А.И., Полухин П.И., Королев А.А. и др. М.: Металлургия. 1981. 576с.
7. Дрейфующая металлургия / Борисов В. // Металлоснабжение и сбыт. 2006, Вып. 11, С.60-65.
8. Исследование процесса смотки горячих труб в бунты: В сб. Создание и исследование машин и агрегатов для производства труб / Акатов А.И., Тепляков Б.В., Ротов И.С. // Труды института. Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения им. Акад. А.И.Целикова. 1981. С.76-82.
9. Неоднородность механических свойств арматурного проката в мотках по его длине: В сб. науч. трудов Строительство, материаловедение, машиностроение. / Гунькин И.А., Журавлев И.И., Левченко Г.В. и др. // Днепропетровск. РИА «Днепр-VAL». 2004. С.250-254.
10. Современное состояние и тенденции развития производства катанки / Тищенко В.А. // Сталь. 2002. Вып. 10, С.46-51.
11. 110-mps wire rod line at Ori Martin, Italy // Danieli News n.145 March 2006. Danieli Group. p.32.
12. Новое оборудование для намотки катанки // Металлург. 2002. Вып. 9, С.36-37
13. Пат. 2256519 Российская Федерация, МПК В21В 47/00. Способ намотки тонкой ленты в рулон и устройство для его осуществления / В.С.Некипелов, заявитель и патентообладатель В.С.Некипелов. Б.И.2005, №20.
14. Giulio Properzi. Guide device for wire rod. Patent USA no. 3,906,772, 1975.
15. Giulio Properzi. Method and apparatus for collecting wire rod or like at the outlet of rolling mills. Patent USA no. 4,109,879, 1978.
16. Математическая модель процесса формирования бунта в моталках проволочных станов / Алимов С.И. // Труды ВНИКИ Цветметавтоматика.М.: 1973. Вып. 3. С.22-29.
17. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. Королев А.А.// М.: Металлургия. 1985. 376 с.

18. Основы механики нити. Минаков А.П. // Труды Московского Текстильного института. Том IX. Вып. 1. 1941. 88 с.
19. Моделирование процесса смотки катанки: В сб. Совершенствование металлургических машин. / Некипелов В.С., Ротов И.С., Акатов А.И. и др. // Труды института. Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения им. Акад. А.И.Целикова. М., 1989, С.105-108.
20. Методы подобия и размерности в механике. Седов Л.И.// М.: Наука. 1977. 440с.
21. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением. Чижиков Ю.М. //М.: Металлургия. 1970. 296с.
22. Промышленные испытания процесса намотки катанки действием динамических сил/ Некипелов В.С., Лукьянов А.В., Карпухин И.И. и др. // Сталь. 2004. №7. С.41-44.
23. Опробование производства арматурной стали класса 500 в бунтах / Бондаренко А.Н., Щербаков В.И., Курбатов Г.А. // Сталь. 2002. №10, С.60-61.
24. Прогнозирование и стабилизация структуры и свойств термоупрочненной арматурной стали: Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Левченко Г.В, Воробей С.А., Ноговицын А.В. и др. // Сб. научн. трудов. Металловедение и термическая обработка. Вып. 7. Г.Днепропетровск. 2004. С.138-144.
25. Производство термоупрочненного арматурного профиля класса 500 на проволочном прокатном стане/ Некипелов В.С., Колесников А.Г., Шикин А.В.// Бюллетень «Черная металлургия». 2018. №3. С.65-67.
26. Сопротивление материалов / Феодосьев В.И. М.: Издательство МГТУ имени Н.Э.Баумана. 2001. 592 с.

Information about the paper in English

V.S. Nekipelov, A.V. Shikin

Vzryvobezопасnost Research&Production Company

Moscow, Russia

E-mail: vnekipelov@bk.ru

Received 20.05.2019

COILING PROCESS DESIGN BASICS AND PILOT TESTING OF INNOVATIVE COILING PROCESSES

Abstract

The authors of this paper developed theoretical design basics for coiling processes (both known and new processes). The paper introduces the concepts of 'process criterion' of the coiling operation and 'coil forming zone'. The process criterion describes the relationship between the key parameters of the coiling process and helps analyse the energy involved in the coiling operation by product type, as well as possible expansion of the assortment for each type of coilers.

This criterion saves designers the need to resort to complex mathematical calculations by enabling them to define the requirements to coilers at the design stage and select the equipment for coiling stations at rolling mills.

Pilot testing of the designed innovative processes integrated in such units as laying coilers and wire feeders demonstrated their effectiveness and reliability enabling such coiling operations that would not be possible before with the coilers available.

Keywords: Coiling, coil forming, coiler, laying coiler, wire feeder, thermal strengthening, rolled wire, rebars



УДК 531.43/46

А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов,
П.В. Макарова, Ю.С. Ляшева
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: antsupov.vp@gmail.com
Дата поступления 01.06.2019

ОЦЕНКА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ

Аннотация

Рассматривая систему "прокатный стан - полоса" с позиций экономической кибернетики, в статье предложена методика аналитической проектной оценки годовой производительности главных линий ШС в функции ресурса и длительности простоев наименее работоспособных элементов. Для проектного расчета ресурса низконадёжных деталей разработаны физико-математические модели их параметрических отказов по различным критериям прочности и износостойкости материалов. Предложенная методика позволяет прогнозировать уровень долговечности ресурсных элементов и соответствующую ему производительность действующих широкополосных станов, а также теоретически исследовать возможные способы продления ресурса лимитирующих элементов по критерию максимальной эффективности функционирования главных приводов.

Ключевые слова: широкополосный стан; главная линия; ненадежные элементы; прогнозирование; ресурс; производительность; повышение; эффективность функционирования.

Описание проблемы

Производительность (годовой объем продукции, доход, суммарный полезный эффект) сложных механических систем, к которым относятся главные (рабочие) линии в первую очередь чистовых клетей широкополосных станов (ГЛ ШС), является одним из основополагающих количественных показателей интенсивности их использования [1]. Полезный эффект, который называют параметром эффективности функционирования сложной механической системы (здесь основного оборудования главных линий чистовых клетей ШС), отображает его главное свойство - выполнять свое функциональное назначение в реальных условиях эксплуатации [2-4].

Параметр эффективности функционирования главной линии - практически возможную годовую производительность стана Q (m/god), определяют произведением технической характеристики q ($m/ч$) основного оборудования на число рабочих

часов в году (годовой фонд рабочего времени) T_p ($ч/god$) [5-6]:

$$Q = q \cdot T_p. \quad (1)$$

В качестве технической характеристики q ($m/ч$) принимают средневзвешенную практически возможную часовую производительность по всему сортаменту (по "приведенному" профилю):

$$q = \left(\frac{a_1}{q_1} + \frac{a_2}{q_2} + \dots + \frac{a_j}{q_j} + \dots + \frac{a_n}{q_n} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_n$ - доли отдельных j -тых профилирумеров полос в сортаменте стана;

$q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_n$ - практически возможная часовая производительность по каждому отдельному j -тому профилирумеру, $m/ч$:

$$q_j = 3600 \cdot G_C \cdot k_H / (t_{цj} \cdot \sum k_P), \quad (3)$$

где 3600 и G_C - число секунд в одном часе и масса исходной заготовки или сляба, m ;

$k_H = 0,9$ - коэффициент использования непрерывных станов, учитывающий неизбежные нарушения ритма прокатки, связанные с уровнем организации производства, состоянием оборудования, квалификацией персонала, степенью трудоемкости сортамента и вызывающие внеплановые, нерегистрируемые простои [5];

$t_{цj} = t_{mj} + t_{\Pi}$ - цикл (ритм, темп) прокатки j -той партии полос в последней клетки чистовой группы, c , определяемый для одной из трех схем прокатки полос на стане [6]. (t_{mj} - время прохода полосы в одной клетки чистовой группы, c ; и t_{Π} - время паузы между концом прокатки предыдущей полосы и началом прокатки следующей в одной клетки, c);

$\sum k_p = G_c / G_{г.л} = k_{н.о} \cdot k_{в.о} \cdot k_{об.к} \cdot k_{об.б} \cdot k_{об.р} \cdot k_{мп}$ - суммарный коэффициент расхода металла, определяемый произведением ряда эмпирических коэффициентов [5]. Здесь $k_{н.о} = 1,01...1,03$ - коэффициент, учитывающий потери металла за счет образования печной окалины; $k_{в.о} = 1,001...1,07$ - коэффициент, учитывающий потери металла за счет образования вторичной (воздушной) окалины; $k_{об.к}$ - коэффициент, учитывающий потери металла из-за обрезки переднего и заднего концов раската перед чистовой группой; $k_{об.б} = 1,05...1,1$ - коэффициент, учитывающий потери металла из-за обрезки боковых кромок; $k_{об.р} = 1,05...1,1$ - коэффициент, учитывающий потери металла из-за обрезки переднего и заднего концов рулона; $k_{мп} = 1,001...1,02$ - коэффициент, учитывающий потери металла на пробы для испытаний.

Широкополосные станы работают по непрерывному графику, поэтому длительность годового фонда рабочего времени T_p в условиях (1) определяется разностью календарного годового фонда T_K времени при 365 днях в году и суммарной годовой продолжительностью остановок стана на

планово-предупредительные и капитальные ремонты T_{PEM} , а также простоев стана T_{Π} по различным (i -тым) причинам:

$$T_p = T_K - T_{PEM} - T_{\Pi} = \left(T_{НОМ} - \sum_{i=1}^{i=k} T_i \right). \quad (4)$$

На широкополосных станах годовую продолжительность ремонтов устанавливают из опыта работы и принимают равной $T_{PEM} = 27 \text{ сут}$, а разность $T_{НОМ} = T_K - T_{PEM} = (365 - 27) \cdot 24 \text{ ч} = 8112 \text{ ч}$ - называют номинальным числом рабочих часов стана в году.

Суммарное время простоев стана $T_{\Pi} = \sum_{i=1}^{i=k} T_i$, предназначенное для проведения перевалок рабочих валков ($i = 1$), опорных валков ($i = 2$), профилактических работ по ТО и восстановлению необходимых ресурсных элементов: шарниров УШ, подшипников, зубчатых механизмов ($i = 3, 4, 5, \dots, m$), настроек и перестроек стана ($i = m + 1$), приемок и сдач смен ($i = m + 2$) и других работ ($i = m + 3, \dots, k$), определяют обычно на основе обобщения опыта эксплуатации конкретного стана.

Для действующих в РФ широкополосных станов значение T_{Π} устанавливают в пределах 7 - 13% от располагаемого фонда времени T_K . Иными словами, длительность годовых простоев на каждом конкретном стане назначают только из опыта эксплуатации имеющегося оборудования, квалификации персонала и вида организованной на стане службы ТОиР в диапазоне $T_{\Pi} = (612...1138) \text{ ч}$. В то же время очевидно, что снижение простоев основного оборудования за счет продления ресурса его низконадежных элементов может привести к существенному повышению производительности исследуемого широкополосного стана и экономической эффективности предприятия.

В этом плане актуальной становится народно-хозяйственная проблема создания научно обоснованного подхода к проектной оценке производительности ШС в функции суммарных наработок до отказа наименее работоспособных (низконадеж-

ных, ресурсных [5]) деталей и узлов и длительности их годовых простоев в заданных условиях эксплуатации. Возможный вариант ее аналитического решения рассматривается ниже с использованием базовых положений экономической кибернетики, физической теории надежности и кинетического подхода к процессам повреждаемости и разрушения конструкционных материалов деталей машин в различных условиях нагружения и внешнего трения.

Методика аналитической оценки и повышения производительности ШС

В основу решения озвученной проблемы могут быть положены базовые идеи системного подхода к исследованию, анализу и улучшению технологии и оборудования листовых станов, предложенные в работах Заверюхи В.Н. и его коллег [7, 8]. Рассматривая систему "прокатный стан - полоса" с позиций экономической кибернетики [7], автор полагает следующее.

Исследуемая система в соответствии с уравнением (1) преобразует годовое рабо-

чее время $T_p, ч/год$ (как разность номинального количества часов в году и количества часов, затрачиваемых на простои, см. (4)) в количество прокатываемых тонн в год $Q (m/год)$ умножением его на часовую производительность $q (m/ч)$, см. рис.1.а;

Если, например, рассмотреть первую группу ресурсных элементов - рабочие валки ($i = 1$), и исследовать время $T_{i=1}$, затрачиваемое в течение года на их перевалки, то по тому же кибернетическому принципу можно полагать, что количество прокатанных тонн в год $Q (m/год)$ может быть преобразовано в "отрицательное" годовое время перевалок рабочих валков $T_{i=1}, ч/год$ в соответствии с уравнением:

$$-T_{i=1} = f \cdot Q, \quad (1.5)$$

где $f = T_{i=1} / Q = t_{i=1} / [Q]_{i=1}$ - передаточный коэффициент цепи отрицательной обратной связи (см. рис.1.б), который определяет долю времени перевалок рабочих валков на одну тонну проката, $ч / m$ [7];

$t_{i=1}$ - длительности одной перевалки рабочих валков, $ч$.

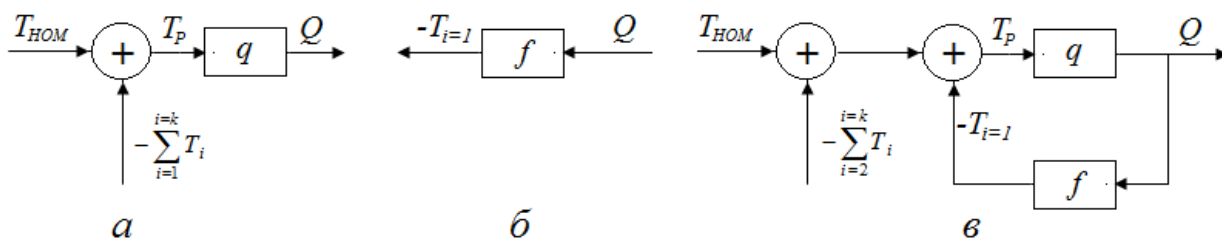


Рисунок 1. Схемы преобразования для расчета производительности ШС [7]
а - времени в количество проката; б - количество проката во время перевалок рабочих валков; в - времени в количество проката с учетом отказов рабочих валков

В условии (5) автор считает неизменной норму количества металла, прокатываемого между перевалками $[Q]_{i=1}$, которая согласно ГОСТ 27.002 [9] называется ресурсом рабочих валков.

Совместным решением уравнений (1) и (5) получаем зависимость [7]:

$$Q = \frac{1}{1 + q \cdot f} \cdot q \cdot \left(T_{НОМ} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right), \quad (6)$$

которая отражается структурной схемой на рис.1.в. Эта зависимость описывает взаимодействие двух преобразователей (q и f),

соединенных по схеме отрицательной обратной связи. Учитывая выражение для определения f , уравнение (6) можно представить в виде искомой зависимости, которая связывает годовую производительность Q с ресурсом $[Q]_{i=1}$ и длительностью простоев $t_{i=1}$ (или $T_{i=1}$) исследуемых низконадежных элементов (в данном случае рабочих валков):

$$Q = \frac{Q}{Q + q \cdot T_{i=1}} \cdot q \cdot \left(T_{HOM} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right) = \frac{[Q]_{i=1}}{[Q]_{i=1} + q \cdot t_{i=1}} \cdot q \cdot \left(T_{HOM} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right) \quad (7)$$

Анализ (6) и (7) позволяет сделать ряд интересных заключений.

а). Величина $\frac{1}{1 + q \cdot f}$ показывает во сколько раз уменьшается длительность годового фонда рабочего времени $T_{HOM} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i$ при учете времени простоев $T_{i=1}$ на перевалки рабочих валков.

б). При неизменных значениях ресурса $[Q]_{i=1}$ рабочих валков и длительности одной перевалки $t_{i=1}$, увеличение часовой

производительности от q_1 до q_2 и далее до q_3 приводит к увеличению числа перевалок в течение года и, соответственно, длительности годовых простоев стана от $T'_{i=1}$ - (за 6 перевалок), до $T''_{i=1}$ - (за 8 перевалок), и до $T'''_{i=1}$ - (за 17 перевалок), см. рис.2. Здесь q_3 равно такому значению, при котором произведение $q_3 \cdot f_3 = 1$, а время годовых простоев на перевалки $T'''_{i=1}$ равно чистому (с учетом пауз между полосами) времени прокатки без перевалок $T_{i=1} = T_p - T_{i=1}$, рис.2, график 3.

в). В связи с необходимостью перевалок годовая производительность увеличивается медленнее по сравнению с ростом часовой (см. рис.2, графики 1 и 2: $q_2 / q_1 = 1,5$, а $Q_2 / Q_1 = 1,3$).

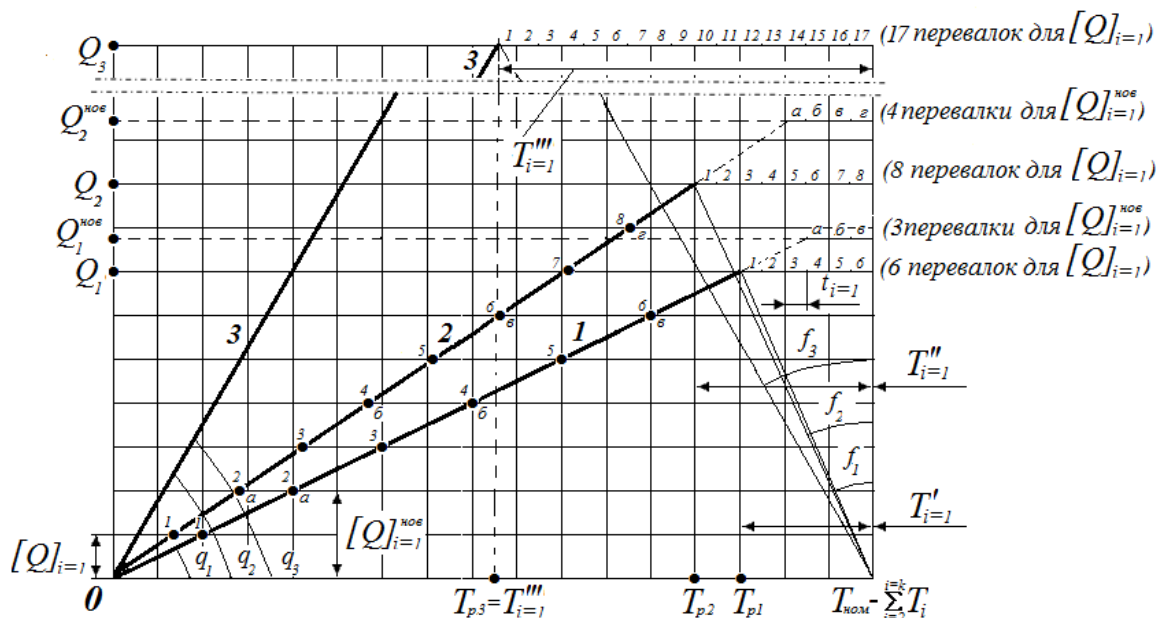


Рисунок 2. Связь производительности Q с длительностью годовых простоев $T_{i=1}$ первого ($i = 1$) исследуемого элемента (рабочих валков)

В связи с тем, что на действующих станах техническая характеристика q остается неизменной ($q = \text{const}$), рост годового дохода Q в рассматриваемом примере возможен только за счет увеличения ресурса рабочих валков $[Q]_{i=1}$ - суммарной ихработки до предельное состояние [9]. На рис.2 показано, что повышение ве-

личины $[Q]_{i=1}$ в два раза (до нового значения $[Q]_{i=1}^{\text{нов}}$) приводит к увеличению годовой производительности:

- для стана с часовой производительностью q_1 (график 1) от величины Q_1 до значения $Q_1^{\text{нов}}$ за счет снижения числа перевалок рабочих валков с шести до трех в год и уменьшения в два раза соответствующей длительности годовых простоев $T'_{i=1}$ на перевалки;

- для стана с часовой производительностью q_2 (график 2) от величины Q_2 до значения $Q_2^{нов}$ за счет снижения числа перевалок рабочих валков с восьми до четырех в год и уменьшения в два раза соответствующей длительности годовых простоев $T_{i=1}''$ на перевалки.

При решении задачи по влиянию на производительность стана Q ресурса $[Q]_{i=1}$ и длительности перевалки $t_{i=1}$ рабочих валков следует учесть, что на некоторых *станах* ресурс рабочих валков часто определяют не массой прокатанных полос в тон-

нах $[Q]_{i=1}$, а соответствующей этому тоннажу длиной прокатанной полосы $[L]_{i=1}$ в километрах (метрах) или продолжительностью их работы $t_{p\ i=1}$ в часах (сутках). Поэтому, учитывая, что $[L]_{i=1} = [Q]_{i=1} / (\rho \cdot h \cdot B)$ и $t_{p\ i=1} = [Q]_{i=1} / q = [L]_{i=1} / V_{np}$ (ρ , h , B , q и V_{np} - удельный вес стали, толщина и ширина средневзвешенного профиля, часовая производительность и скорость прокатки в последней клетке стана), зависимость (7) для проектного расчета производительности *ШС* можно записать в виде:

$$Q = \frac{[L]_{i=1}}{[L]_{i=1} + q \cdot t_{i=1} / (\rho \cdot h \cdot B)} \cdot q \cdot \left(T_{НОМ} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right) \quad (8)$$

или

$$Q = \frac{t_{p\ i=1}}{t_{p\ i=1} + t_{i=1}} \cdot q \cdot \left(T_{НОМ} - \sum_{i=2}^{i=k} T_i \right). \quad (9)$$

Подобный анализ с использованием структурной схемы на рис. 1.в и уравнений (6) - (9) можно повторить для других ресурсных элементов: опорных валков ($i = 2$), шарниров универсальных шпинделей ($i = 3$), подшипниковых опор ($i = 4$), зубчатых зацеплений ($i = 5$) и так далее для $i = 6, \dots, k$.

Универсальность полученного уравнения (9) при подстановке в него требуемого значения индекса i (вместо значения $i = 1$) заключается в том, что оно отвечает поставленной цели и связывает эффективность функционирования Q основного оборудования *ШС* одновременно с ресурсом $t_{p\ i}$ исследуемого низконадежного i -того элемента и длительностью t_i его единичного простоя для восстановления его работоспособности.

Если значения единичных t_i и годовых T_i простоев для восстановления (ремонта) тех или иных i -тых низконадежных элементов определяется продолжительностью операций ТОиР [3] и в проектных расчетах производительности Q по условию (9) выступают в качестве заданных параметров, то проблема аналитического прогнозирования их ресурса $t_{p\ i}$ в современной

литературе находится в стадии разработки. Ниже представлен авторский вариант ее решения.

Модели отказов низконадежных элементов главных приводов ШС

Решение вопросов проектной аналитической оценки ресурса перечисленных выше i -тых наименее работоспособных деталей и узлов *ГЛ ШС* усложняется не только множеством условий и режимов их силового и теплового нагружения, применяемых материалов и конструктивных особенностей, но и, как следствие, большим разнообразием причин их отказов.

Поэтому математические модели отказов для прогнозирования ресурса $t_{p\ i}$ всех исследуемых i -тых наименее работоспособных элементов *ГЛ ШС* следует разбить на два класса:

- модели перехода нагруженных элементов (деталей) *ГЛ* в предельное состояние по критериям прочности;
- модели потери работоспособности узлов трения (трибосопряжений) *ГЛ* по критериям износостойкости.

При построении указанных математических моделей, на наш взгляд, можно использовать систему базовых уравнений физической теории надежности технических

объектов [10-13] в совокупности с основополагающими зависимостями кинетического подхода: термодинамической теории

прочности твердых тел и энерго-механической концепции изнашивания узлов трения [14-17].

Для прогнозирования ресурса t_{pi} исследуемого i -того элемента (детали) по критериям статической или усталостной прочности (при растяжении, сжатии, изгибе, кручении, сложном сопротивлении, контактном взаимодействии и других видах стационарного нагружения) сформулируем модель его отказа [10, 11, 13]. Она включает:

- систему определяющих уравнений для последовательной оценки:

- скорости повреждаемости i -того элемента при прокатке j -той партии полос последовательно для $j=1, 2, 3, \dots$:

$$\dot{u}_{eij} = k_{cmpi} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot T_{ij}}{h} \cdot U'_0(\sigma_{0ij}, T_{ij}) \cdot \exp\left(-\frac{U'_0(\sigma_{0ij}, T_{ij})}{k \cdot T}\right) \cdot sh\left(\frac{A_{fij}^0}{2 \cdot k \cdot T_{ij}}\right);$$

- текущей плотности дефектов его материала: $u_{eij} = u_{ei0} + (\sum \dot{u}_{eij} \cdot t_j)$;

- ресурса i -того элемента: $t_{pi}^n = k_{\Pi i} \cdot \left[(\sum t_{j-1}) + \frac{u_{eij} - u_{ei j-1}}{\dot{u}_{eij}} \right],$

при $u_{eij} \geq u_{ei*}$, $j = j_{\Pi}^*$, конец расчета;

(10)

- рассмотренные ниже зависимости для расчета входящих в систему (10) параметров, отражающие краевые условия эксплуатации, технологические и конструктивные особенности исследуемой i -той детали.

Параметры, входящие в первое и второе уравнение системы (10) [11, 13, 14].

$\dot{u}_{eij}$ - скорость накопления энергии искажений (дефектов) атомно-молекулярной структуры материала наиболее напряженного локального объема материала i -той исследуемой детали в процессе прокатки j -той партии полос.

u_{eij} - текущая суммарная плотность энергии дефектов, накопленная в локальном наиболее напряженном объеме материала, где действует максимальное расчетное напряжение σ_{ij} , после прокатки партий полос последовательно от первой до текущей j -той.

$t_j = \frac{G_j}{\rho_j \cdot b_j \cdot h_j \cdot V_j}$ - длительность про-

катки j -той партии полос массой G_j с поперечным сечением $b_j \cdot h_j$, плотностью материала ρ_j , со скоростью V_j прокатки.

k_{cmpi} - коэффициент упрочнения структуры материала детали:

$$k_{cmpi} = \frac{2 \cdot (u_{ei*} - u_{ei0})}{3 \cdot u_{ei*} - u_{ei0}}. \quad (10.a)$$

k, h - постоянная Больцмана и постоянная Планка.

u_{ei0} и u_{ei*} - начальное и критическое значение плотности скрытой энергии дефектов u_{eit} структуры материала i -того элемента соответственно [14]:

$$u_{ei0} = \frac{(0,071 \cdot HV_i)^{2,4} \cdot k_{\sigma i}^2}{6 \cdot G_i} \quad (10.б)$$

$$u_{ei*} = \Delta H_{TBi} - u_{Ti j}$$

$$HV_i \text{ и } G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \mu_i)}, \quad E_i \text{ и } \mu_i - \text{исход-}$$

ная твердость по Виккерсу, модуль сдвига, линейный модуль упругости и коэффициент Пуассона материала.

$$k_{\sigma i} = \frac{1}{6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV_i + 0,12 \cdot 10^{-21}} - \text{ком-}$$

плексный структурный параметр.

ΔH_{TBi} - энтальпия плавления материала детали в твердом состоянии при температуре плавления T_{Si} .

$u_{Tij} = \rho_i \cdot c_i \cdot T_{ij}$ - энтальпия материала исследуемого элемента при температуре T_{ij} ; $c_{ij}(T_{ij})$ и $\rho_{ij}(T_{ij})$ - теплоемкость и плотность материала.

T_{ij} - текущая (j -тая) средняя по деформируемому объему температура материала элемента, определяемая по методике В.В. Федорова [14, 13].

$U'(\sigma_{0i}, T_{ij})$ - энергия активации образования дефектов при температуре T_{ij} и напряжении σ_{0ij} (σ_{0ij} - среднее напряжение или шаровая часть тензора напряжений):

$$U'_{ij}(\sigma_{0i}, T_{ij}) = U_i(p_{T,0}) - \Delta U_{Tij} - A_{vij}^0, \quad (10.в)$$

$U_i(p_{T0})$ - начальная энергия активации разрушения структуры с учетом теплового давления p_{T0} при T_{0i} и $\sigma = 0$:

$$U_i(p_{T0}) = \frac{-2,415 \cdot 10^{-28} \cdot T_{0i}^3 + 5,955 \cdot 10^{-25} \cdot T_{0i}^2 + 0,0121 \cdot 10^{-20} \cdot T_{0i} + 12,286 \cdot 10^{-20}}{V_{ami}}. \quad (10.г)$$

V_{ami} - атомный объем материала исследуемого i -того элемента.

$\Delta U_{Tij} = 1,5 \cdot \alpha_{0i} \cdot K_i \cdot T_{ij}$ - изменение энергии активации от температуры саморазогрева локальных объемов от $T = 0, ^\circ\text{C}$ до $T_{ij}, ^\circ\text{C}$.

α_{0i} - коэффициент линейного теплового расширения материала детали;

$K_i = \frac{E_i}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu_i)}$ - объемный модуль упругости.

A_{vij}^0 - работа шарового тензора напряжений (среднего напряжения) σ_{0ij} , затраченная на изменение объема локальной зоны деформируемого элемента:

$$A_{vij}^0 = \frac{\phi_{\sigma i}^2 \cdot M_{ri}^2 \cdot \sigma_{0ij}^2}{2 \cdot K_i}. \quad (10.д)$$

$\phi_{\sigma i} = k_{\sigma i} \cdot v_{0i}^{0,5}$ - коэффициент перенапряжения на межатомных связях.

$M_{ri} = \left[\frac{\sigma_{Ti} \cdot (65 + 0,46 \cdot HV_i)}{\sigma_{ri}^2} \right]^{0,5}$ - коэффициент эквивалентности циклического и статического напряженного состояния.

σ_{ri} - предел выносливости материала, определяемый в функции предела прочности.

Работа A_{fij}^0 девиатора напряжений (интенсивности напряжений) σ_{Dij} , затраченная на изменение формы локального объема деформируемого элемента:

$$A_{fij}^0 = \frac{\phi_{\sigma i}^2 \cdot M_{ri}^2 \cdot \sigma_{Dij}^2}{6 \cdot G_i}; \quad (10.е)$$

σ_{0ij} и σ_{Dij} - шаровая и девиаторная части тензора напряжений в условиях (10.д) и (10.е) определяются в зависимости от вида напряженного состояния наиболее нагруженных локальных объемов i -того элемента по известным уравнениям сопротивления материалов [11, 13, 14].

Параметры, входящие в третье уравнение системы (10).

t_{pi}^{Π} - расчетный ресурс исследуемого i -того низконадежного элемента по причине потери прочности (целостности) структуры его материала в том локальном объеме (объемах) материала, где действует максимальное напряжение σ_{ij} .

j_{Π}^* - номер партии полос, предшествующей предельной - ($j_{\Pi}^* + 1$)-вой, в процессе прокатки которой произойдет отказ исследуемой детали по энергетическому условию разрушения, см. (10).

$$k_{\Pi i} = \frac{t_j + t_{наызj}}{t_j} - \text{коэффициент, учитывающий увеличение длительности прокатки } j\text{-той партии полос на время пауз}$$

$t_{\text{пауз } j} = n_j \cdot t_{\text{п}}$ между полосами (n_j - число полос в j -той партии; $t_{\text{п}}$ - время паузы).

Алгоритмизация математической модели (10) - (10.а-ж) определит методику аналитической оценки ресурса любого исследуемого i -того элемента ГЛШС по требуемому критерию прочности структуры их материала.

В основу построения построении моделей отказа любого i -того низконадежного узла трения главного привода исследуемой клетки ШС при прокатке в ней j -

тых партий полос, положим условие износостойкости, записанное в виде единого неравенства: $y_{ij} \leq y_{i*}$. Здесь y_{ij} - текущий максимальный износ исследуемого трибосопряжения, определяемый для стационарных условий трения и усталостного изнашивания [13, 15]; y_{i*} - предельное значение износа узла, установленное в нормативной документации.

В этом случае для расчета предполагаемого ресурса t_{pi} какого-либо i -того сопряжения сформулируем модель его отказа по критерию износостойкости, которая включает [13, 15]:

$$\left. \begin{aligned} & \text{- систему определяющих уравнений для последовательного расчета:} \\ & \quad \text{- скорости изнашивания } i\text{-того сопряжения при прокатке } j\text{-той партии} \\ & \quad \text{полос последовательно для } j=1, 2, 3, \dots: \\ & \quad \dot{y}_{ij} = \frac{\alpha_i^* \cdot v_i \cdot f_{\text{мех } ij}^y \cdot p_{ij} \cdot V_{\text{ск } i}}{\Delta H_{Si} - u_{ei0} - u_{Tij}}; \\ & \quad \text{- текущего износа сопряжения:} \quad y_{ij} = (\sum \dot{y}_{ij} \cdot t_j); \\ & \quad \text{- ресурса } i\text{-того элемента: } t_{pi}'' = k_{\text{п } i} \cdot \left[(\sum t_{j-1}) + \frac{y_{ij} - y_{ij-1}}{\dot{y}_{ij}} \right], \\ & \quad \text{при } y_{ij} \geq y_{i*}, \quad j = j^*, \quad \text{конец расчета;} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

- представленные ниже математические выражения для расчета входящих в систему (11) параметров, определяющих краевые условия исследуемого сопряжения при его изнашивании в стационарных условиях трения.

Параметры, входящие в первое и второе уравнения системы (11) [11, 13, 15].

$\dot{y}_{ij}$ - скорость изнашивания, исследуемого i -того сопряжения при прокатке j -той партий полос, которую для сокращения объема статьи будем определять как скорость изнашивания трибоэлемента из менее износостойкого материала.

y_{ij} - текущий суммарный износ сопряжения после прокатки партий полос от первой до j -той.

$\alpha_i^* = A_{ai} / A_{Ti}$ - коэффициент перекрытия площади трения A_{Ti} изнашиваемого трибоэлемента номинальной площадью контакта A_{ai} .

v_i - коэффициент поглощения внешней энергии трения поверхностным слоем материала изнашиваемого элемента, определяемый по методике Б.В. Протасова [13, 15].

$f_{\text{мех } ij}^y$ - механическая составляющая коэффициента трения, определяемая согласно [13, 15] для установившегося процесса трения и усталостного изнашивания в функции вида контакта, физико-механических характеристик материалов поверхностных слоев и параметров шероховатости поверхностей при температуре T_{ij} , вычисляемой по методике А.В. Чичинадзе.

p_{ij} - среднее (или максимальное) номинальное давление на контакте возникающее в сопряжении при прокатке j -той партий полос.

V_{cki} - скорость относительного скольжения элементов i -того сопряжения.

ΔH_{Si} - энтальпия плавления материала изнашиваемого элемента в жидком состоянии при температуре T_{Si} плавления;

u_{e0} - исходная плотность скрытой составляющей внутренней энергии материала поверхностного слоя изнашиваемого элемента, см. (10.а).

u_{Tij} - энтальпия материала изнашиваемого трибоэлемента при температуре T_{ij} установившегося режима трения, см. (10.б).

Параметры, входящие третье уравнение системы (11).

t_{pi}^H - расчетный ресурс исследуемого i -того низконадежного узла трения по причине достижения (или превышения) его текущим износом предельного значения: $y_{ij} \geq y_{i*}$.

j_H^* - номер партии полос, предшествующей предельной - ($j_H^* + 1$)-вой, в процессе прокатки которой произойдет отказ исследуемого узла по критерию износостойкости изнашиваемого трибоэлемента, см. (11).

Алгоритмизация математической модели (11) и зависимостей для определения входящих в нее параметров, определит методику аналитической оценки ресурса любого исследуемого i -того трибосопряжения ГЛ ШС по критерию его износостойкости.

Заключение

Обобщая полученные результаты можно заключить, что совокупность уравнений (9), (10), (11) и вспомогательных зависимостей позволяет:

- выполнить проектную оценку ресурса всех наименее работоспособных элементов главных приводов широкополосных станков и определить соответствующий им

уровень эффективности функционирования исследуемого широкополосного стана;

- теоретически исследовать влияние различных конструктивных и технологических способов продления ресурса t_i малонадежных деталей и узлов на повышение производительности действующего ШС и выбирать из них оптимальные (по критерию максимальной эффективности функционирования) решения.

Библиографический список

1. Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования.- М.: Машиностроение, 1986.- 224с.
2. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: Учебник. -М.: Логос, 2003.-208с.
3. Ченцов Н.А. Организация, управление и автоматизация ремонтной службы: Учебник.- / Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.Я. Седуша, Донецкий национальный технический университет.- Донецк: Норд-Пресс-УНИТЕХ, 2007.- 258с.
4. Надежность в машиностроении: Справочник 1 / Н17 Под общ. ред. В.В. Шашкина, Г. П. Карзова.- СПб.: Политехника, 1992.- 719 с
5. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. М.: Металлургия, 1986. 430с.
6. Прокатное производство: 3-е изд., перераб. и доп. /П.И. Полухин, Н.М. Федосов, А.А. Королев, Ю.М. Матвеев. М.: Металлургия, 1982. 686с.
7. Заверюха В.Н. Влияние изнашиваемости рабочих валков на производительность станков горячей прокатки // Известия вузов. Черная металлургия.-1976.- №9.-С. 99 - 101.

8. Заверюха В.Н. Формализация и классификация кинематических структур способов прокатки / В.Н. Заверюха, М.И. Румянцев, В.П. Анцупов // Известия вузов. Черная металлургия.-1983.- №5.-С. 148 - 149.
9. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Москва. Стандартинформ, 2016.- 22с.
10. Анцупов А.В. (мл.). Развитие теории прогнозирования надежности деталей машин / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №2. С.26-32.
11. Анцупов А.В. (мл.) Аналитический метод проектной оценки ресурса элементов металлургических машин / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Том 60. №1. С.30-35.
12. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560с.
13. Оценка ресурса деталей и узлов металлургических машин на стадии их проектирования и эксплуатации: Учебное пособие. / А.В. Анцупов (мл), М.Г. Слободянский, В.П. Анцупов, А.В. Анцупов - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. 211 с.
14. Федоров В.В. Основы эргономики и синергетики деформируемых тел / В.В. Федоров; под ред. С.В. Федорова. - Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО "КГТУ", 2014.- Ч.III. Основы эргономики деформируемых тел.- 222с.
15. Энерго-механическая концепция прогнозирования ресурса узлов трения по критерию износостойкости элементов / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, В.А. Русланов // Трение и износ. – 2016, Т. 37, №5, С. 510-516.
16. Выбор износостойких материалов при проектировании узлов трения / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов и др. // Материалы 67-й научно-технической конференции: сб. докл. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009.- Т.1.- С. 197-200.
17. Модель параметрических отказов валковых систем кварто по различным категориям / А.В. Анцупов (мл), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, А.М. Овсов // Производство проката. 2015. №2. С. 35-42.

Information about the paper in English

**A.V. Antsupov (Jr), A.V. Antsupov, V.P. Antsupov,
P.V. Makarova, Yu.S. Lyasheva**
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: antsupov.vp@gmail.com
Received 01.06.2019

ANALYSING AND ENSURING THE EFFICIENCY OF THE MAIN COMPONENTS OF A WIDE-STRIP MILL

Abstract

This paper examines the system “rolling mill - strip” from the point of view of economic cybernetics and proposes an analytical technique for estimating the annual capacity of the main lines of a wide-strip mill as a function of its service life and the downtime caused by the least reliable components. For design estimation of the low-reliability parts’ service life, physico-mathematical models of the parametric failures of such parts were developed based on various criteria related to the strength and wear resistance of the materials in view. The proposed technique helps predict the components’ life and the corresponding capacities of the running wide-strip mills. It also enables to perform a theoretical study in order to understand how the life of the bottleneck components can be extended based on the maximum efficiency of the main drive.

Keywords: wide-strip mill, main line, unreliable components, predicting, life, capacity, increase, efficiency.



УДК 621.9.048.7+621.78

**А.В. Алифанов, В.Н. Алехнович,
А.М. Милюкова, А.И. Михлюк, О.А. Толкачева**
Государственное научное учреждение
«Физико-технический институт НАН Беларуси»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: alifanov_aav@mail.ru
Дата поступления 31.05.2019

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСТОЯННО-ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ НА КАЧЕСТВО НАНЕСЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация

Предлагаемый постоянно-импульсный способ нанесения упрочняющих покрытий на стальные детали с помощью разработанного плазмотрона позволяет интенсифицировать диффузионный процесс наплавляемого материала, повысить адгезию и, соответственно, прочность нанесенных покрытий. Разработанный надежный в эксплуатации плазмотрон оснащен модернизированным порошковым питателем. Особенностью разработанной конструкции плазмотрона является то, что питатель может осуществлять подачу порошка к плазмотрону или в постоянном режиме, или в импульсном режиме определенными порциями. Постоянно-импульсный способ нанесения покрытий снижает термическую нагрузку на упрочняемую деталь, при этом увеличивается скорость диффузии наплавляемого износостойкого материала, что позволяет осуществлять наплавку тонкостенных деталей без их проплавления.

Ключевые слова: плазменная наплавка, упрочняющие покрытия, постоянно-импульсный режим, адгезия, диффузия, прочность.

Введение

Целью данного исследования является разработка процесса плазменной наплавки высокопрочных самофлюсующихся порошковых материалов на стальные, в том числе тонкостенные, изделия с использованием постоянно-импульсного режима работы плазмотрона. Такой режим работы позволяет уменьшить опасность проплавления наплавляемого тонкостенного изделия, уменьшить термические нагрузки, повысить качество наплавленного слоя.

Для достижения поставленной цели в лаборатории объемных гетерогенных систем Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси разработан специальный наплавочный плазмотрон [1, 2]. Для создания условий, способствующих интенсификации диффузии наплавляемых элементов вглубь упрочняемой детали, получения тепловых волн в наплавляемом материале, был разработан

источник питания плазмотрона, позволяющий получить на выходе постоянно-импульсное напряжение [3]. Разработанный источник питания содержит независимые друг от друга источники дежурной и основной дуги, блоки высоковольтного и высокочастотного поджига дежурной дуги. Напряжение питания основной дуги прикладывается между катодом и анодом плазмотрона.

Напряжение питания дежурной дуги прикладывается между катодом плазмотрона и упрочняемой деталью. Режим работы плазмотрона с использованием дежурной дуги позволяет повысить стабильность работы плазмотрона. Разработанный источник питания основной дуги позволяет обеспечить постоянный или постоянно-импульсный режим работы плазмотрона, обеспечивающий стабильную работу на минимальном токе с одной стороны, с другой стороны – для обеспечения высокого качества наплавки, сведения к минимуму опасности проплавления тонкостенных

упрочняемых поверхностей и возникновения термических поводов. Для питания плазмотрона используется наряду с постоянной составляющей напряжения и импульсная составляющая.

Значение частоты следования и длительность импульсной составляющей, питающей плазмотрон в источнике питания, регулируются и устанавливаются оператором в ручном или автоматическом режиме.

Методы исследований

Температура на поверхности образцов измерялась модернизированной головкой АПИР на базе полупроводникового диода и пирометра TemPro. Температура в теле образца определялась с помощью хромель-алюмелевой термопары и последующей регистрацией милливольтметром. Напряжение, ток дуги регистрировались стрелочными приборами, а расход плазмообразующего газа — газовым ротаметром. Для регистрации изменения элементного состава легирующих элементов по глубине было предложено использовать метод «косого шлифа». С этой целью был изготовлен косой шлиф переходной зоны (с углом скоса около 3 градусов), что повышает точность исследований за счет увеличения длины переходной зоны в 18–20 раз. Исследование поэлементного состава легирующих элементов вглубь по поверхности косого шлифа осуществлялось на электронном микроскопе микрозондом.

Основные положения

Исследование постоянно-импульсных тепловых потоков в теле упрочняемого металла при работе плазмотрона [1, 3, 4–6].

При выполнении работы были проведены исследования нагрева металлического образца из стали Ст3 диаметром 40 мм и длиной 30 мм. Измерение температуры осуществляется в двух местах: на поверхности в центре образца и глубине 2,0 мм от обрабатываемой поверхности. Зависимость скорости нагрева образца плазменной струей мощностью 1,5 кВт на поверхности и на глубине 2,0 мм приведена на рисунке 1.

При постоянно-импульсном нагреве на поверхности и глубине возникают тепловые волны. Так, наличие импульсной составляющей тока плазмотрона с частотой

следования импульса 1 импульс за секунду, колебания температуры на нагреваемой поверхности образца относительно максимального значения изменяются на ± 150 °С. Увеличение частоты следования импульсов в 5 раз (5 импульсов за секунду) приводит к уменьшению колебания температуры на поверхности образца на ± 5 °С, а при увеличении частоты следования импульсов в 10 раз (10 импульсов за секунду), колебания температуры на поверхности образца исчезают. Колебания же температуры на глубине 2,0 мм наблюдаются только при частоте следования 1 импульс за секунду.

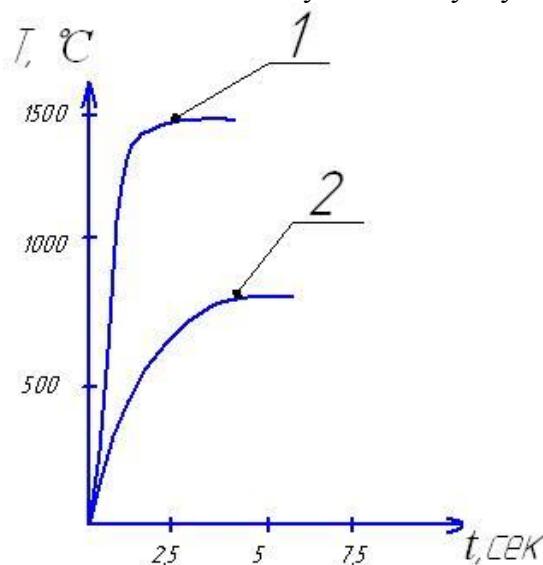


Рисунок 1. Зависимость скорости нагрева образца плазменной струей на поверхности и на глубине 2,0 мм: 1 — на поверхности образца, 2 — на глубине 2,0 мм от нагреваемой поверхности

Исследование влияния режимов плазменной наплавки с использованием постоянно-импульсной плазмы на адгезионную прочность нанесенных покрытий и диффузию наплавляемого материала в упрочняемое тело [7–11].

Прочность сцепления наплавляемого порошкового материала и диффузия элементов в упрочняемую поверхность в процессе плазменной наплавки имеет важное практическое значение. Изучение особенностей нагрева плазмотроном, работающем на постоянном и постоянно-импульсном напряжении, позволяет получить различные особенности нагрева упрочняемой поверхности.

В процессе выполнения работы была установлена зависимость напряжения на дуге от силы тока дуги и расхода плазмообразующего газа аргона (рисунки 2 и 3 соответственно).

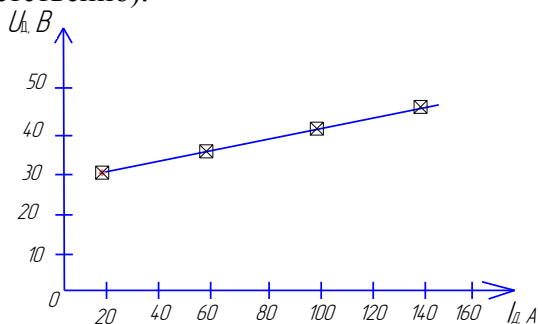


Рисунок 2. Зависимость напряжения на дуге от силы тока дуги

Установлено, что напряжение дуги зависит от силы тока дуги линейно (рисунок 2), а изменение расхода газа (аргона) через плазмотрон имеет криволинейную зависимость от напряжения на дуге (рисунок 3). Работа плазмотрона с расходом плазмообразующего газа менее 40 литров за час приводит к нестабильному режиму (возможно горение дуги внутри плазмотрона).

Увеличение расхода плазмообразующего газа (аргона) более 90–100 литров за час приводит к изменению характера истечения газовой струи плазмотрона с ламинарного на турбулентное. Зависимость увеличения напряжения на дуге от расхода плазмообразующего газа (аргона) показана на рисунке 3.

Для исследования диффузии легирующих элементов в упрочняемый образец в процессе плазменной наплавки были проведены исследования изменения элементарного состава системы «покрытие-подложка» в переходной зоне.

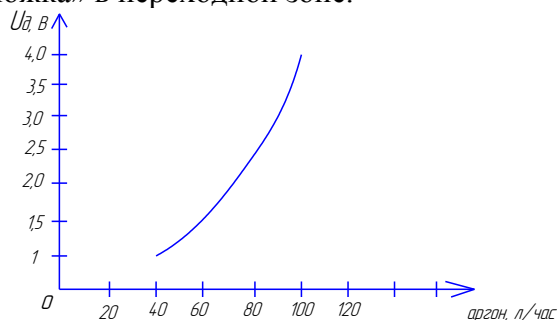


Рисунок 3. Зависимость увеличения напряжения U_d на дуге от расхода плазмообразующего газа (аргона)

Полученные данные позволили сделать выводы об отсутствии аномальной диффузии легирующих элементов наплавленного материала в материал подложки при работе плазмотрона на постоянном напряжении.

Установлено, что в случае использования для питания плазмотрона постоянно-импульсного напряжения, имеющего крутой передний фронт, достаточные длительность и интенсивность, происходит локальный кратковременный разогрев подложки в отдельных точках действия плазменной дуги до температуры 0,57–0,78 температуры плавления металла основы. Данное обстоятельство позволяет увеличить энергию легирующих элементов: скорость диффузии и силу сцепления наплавляемого слоя с основой в отдельных точках.

Плазменная струя, выходя из анодного сопла плазмотрона, стремится расширяться и на расстоянии больше, чем 25–30 мм защитный газ аргон из плазмотрона смешивается с воздухом, теряя свои защитные свойства и вызывая образование окисных пленок на обрабатываемой поверхности. Данное обстоятельство ухудшает качество наносимого покрытия и сцепление наносимого материала с материалом подложки, т.е. ухудшает адгезию.

Поэтому для сохранения качества покрытия и обеспечения его адгезии к подложке, процесс нанесения покрытия необходимо осуществлять на расстоянии не более 20 мм при ламинарном истечении плазменной струи из плазмотрона.

Большое значение на условия формирования наплавленного слоя оказывает температура предварительного подогрева обрабатываемой поверхности. Значительное повышение температуры напыляемой поверхности может вызвать термические поводки и ее проплавление. Использование защитного газа аргона позволяет ограничить нагрев наплавляемой поверхности до 150–170 °С.

При ударе о поверхность образца сферические частицы сильно деформируются и затвердевают, приобретая форму тонкого диска. Высокая скорость деформации и растекание расплавленной частицы приводит к

образованию прочного физического и химического контакта. Прочное сцепление происходит только при подогреве подложки до определенной температуры.

Исследование влияния режимов плазменной наплавки на структуру, твердость и пористость наносимых покрытий.

Проведены исследования влияния режимов плазменной наплавки на структуру, твердость и пористость наносимых покрытий. Для наплавки на образцы из стали 65Г и 60ПП использовали самофлюсующиеся износостойкие материалы ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-01.

На рисунке 4 представлены внешний вид макро- и микрошлифы из наплавленного

ного на стальные образцы самофлюсующегося порошкового сплава на никелевой основе марки ПГ-10Н-01.

Режим наплавки и результаты измерений твердости ($H_{\mu 1}$, $H_{\mu 2}$) приведены в таблице 1, где $G_{\text{пг}}$, $G_{\text{тг}}$, $G_{\text{зг}}$, соответственно, объёмные расходы плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов (аргон); $G_{\text{п}}$ — массовый расход порошкового присадочного материала, $I_{\text{д}}$ — величина тока дуги, А; $U_{\text{д}}$ — величина напряжения на дуге, В. Измерения $H_{\mu 1}$ выполнялись на шлифованной поверхности наплавленного слоя твердомером ТК-2М, а $H_{\mu 2}$ — в поперечном сечении (шлифе) с помощью ультразвукового измерителя твердости МЕТ У1А.

Таблица 1

Параметры режима наплавки

$I_{\text{д}}$, А	$U_{\text{д}}$, В	$G_{\text{пг}}$, л/мин	$G_{\text{тг}}$, л/мин	$G_{\text{зг}}$, л/мин	$G_{\text{п}}$, г/мин	$H_{\mu 1}$, HRC	$H_{\mu 2}$, HRC
60	30	2,8	2,3	9,4	4	47-52	48-50

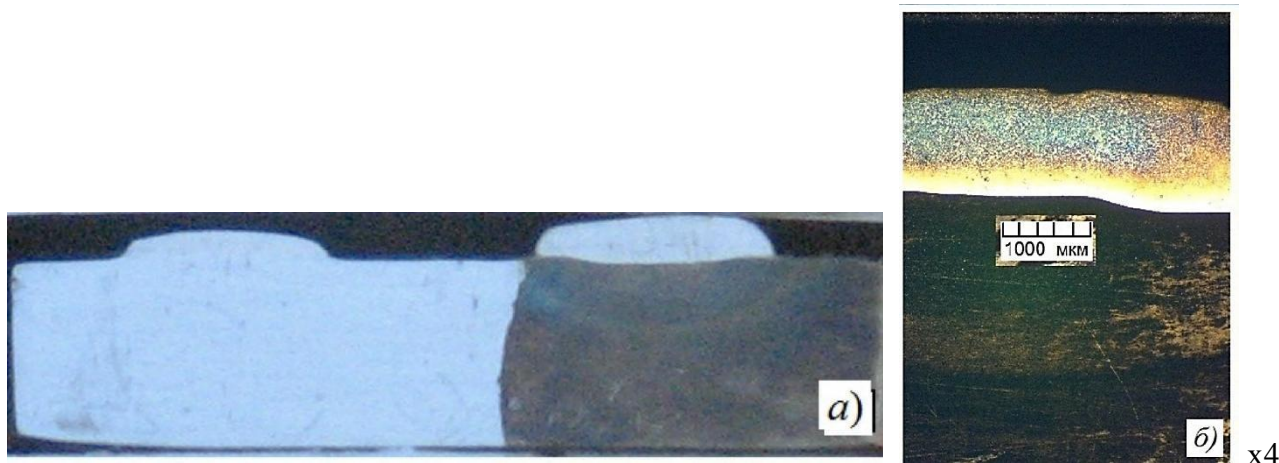


Рисунок 4. Макро- и микрошлифов наплавки: *а* — внешний вид макрошлифов; *б* — микрошлиф с использованием травителя «марбле»; *в* — микрошлиф с использованием травителя «ниталь»

В обоих случаях получены близкие по значениям величины H_{μ} , однако полученные значениям меньше регламентированной твердости порошкового сплава ПГ-12Н-01 (56-62 HRC). Возможно, данные различия связаны с неоднородным распределением микротвердости по глубине наплавленного слоя (рисунок 5), небольшой его толщиной и относительно «мягкой» подложкой из стали 65Г (≈ 30 HRC). Граница раздела покрытия и основного металла располагается

на расстоянии примерно 2 мм от поверхности вдоль линии измерения микротвердости слоя (линия МН на рисунке 5). С учётом глубины проплавления основного металла 0,3 мм толщина наплавленного покрытия составляет примерно 1,7 мм при ширине зоны наплавки 9 мм.

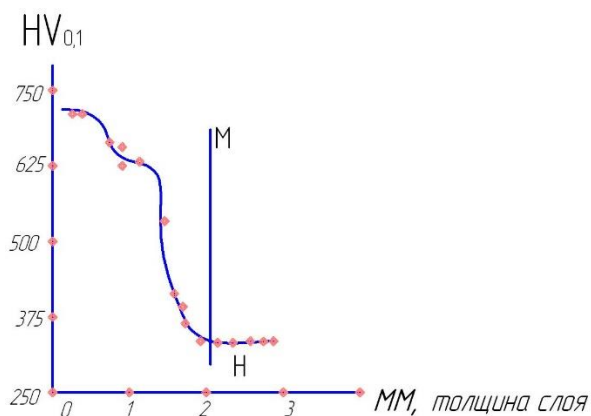


Рисунок 5. Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного слоя вглубь основы

Справа от разграничительной линии MN регистрировались значения микротвердости основного металла, изменяющиеся в пределах 360–260 HV_{0,1} при увеличении расстояния от 2 до 4 мм. Слева от линии MN, по направлению к поверхности наплавленного слоя, микротвердость увеличивается почти в два раза при уменьшении расстояния от 2 до 1,3 мм.

Основной причиной такого распределения микротвердости на этом участке, по-

видимому, является значительное разбавление материала покрытия основным металлом, а также наличие на поверхности подложки обезуглероженного слоя. При дальнейшем уменьшении расстояния до поверхности наплавленного слоя ($h < 1,3$ мм) измеренная микротвердость увеличивается с 620 HV_{0,1} до ≈ 740 HV_{0,1} причем наблюдается ее «ступенчатое» распределение, причина которого заключается в текстурированности данного участка покрытия.

Исследовано влияние расстояния от сопла плазмотрона до поверхности подложки $l_{\text{сп}}$ на размеры и микротвердость наплавленных слоёв. При скорости перемещения плазмотрона $v = 1200$ мм/мин и расстоянии $l_{\text{сп}} = 8–12$ мм формировались отдельные дорожки шириной 3–3,5 мм (рисунок 6) и длиной 50 мм; максимальная толщина покрытий при этом не зависит от величины расстояния от сопла до подложки и составляет примерно 200 мкм. Наличие на периферии наплавленных валиков отдельных частиц нерасплавленного порошка (рисунок 6) свидетельствует о том, что размеры зоны ввода присадочного порошкового материала больше размеров сварочной ванны (ванны расплавленного металла).

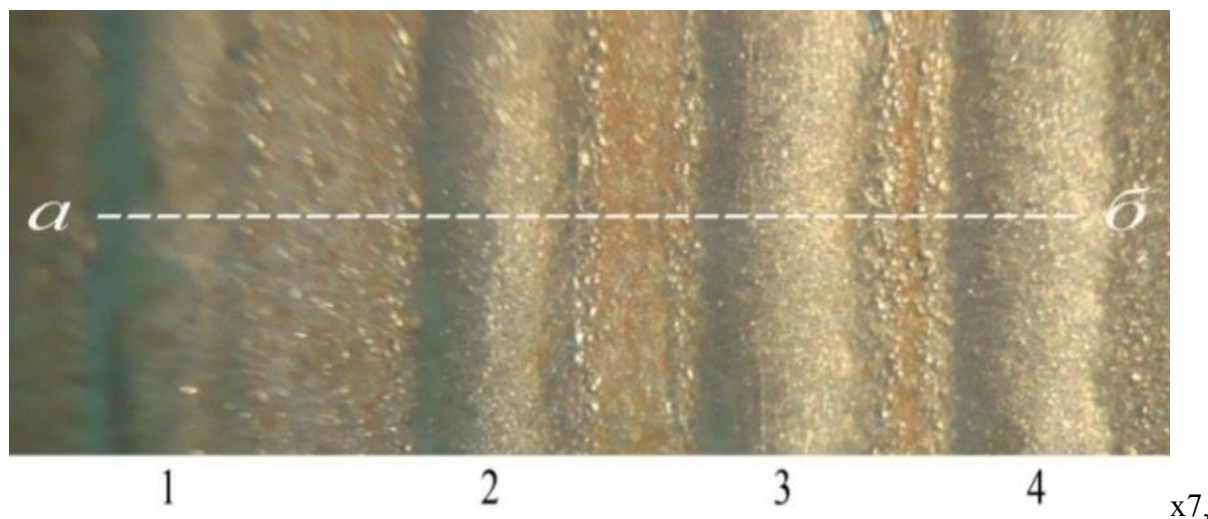


Рисунок 6. Вид (фрагмент) наплавленного материала на сталь 60ПП:

$a-b$ — линия разреза,

1 — $l_{\text{сп}} = 9$ мм; 2 — $l_{\text{сп}} = 10$ мм;

3 — $l_{\text{сп}} = 11$ мм; 4 — $l_{\text{сп}} = 12$ мм

Шлиф (для исследований) вырезался по линии $a-b$ (рисунок 6), перпендикулярно поверхности наплавки, и протравливался в нитале. Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного покрытия имеет немонотонный характер (рисунок 7). Причем, максимальная микротвердость наплавленного порошкового сплава ПГ-10Н-01 превышает $725\text{ HV}_{0,1}$.

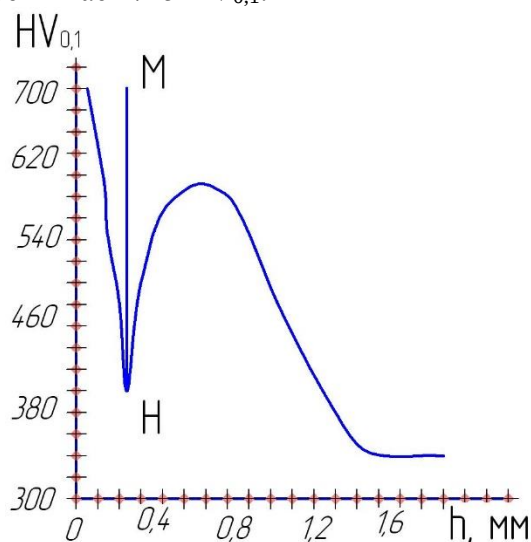


Рисунок 7. Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного слоя вглубь основы

Уменьшение микротвердости составляет для сталей 65Г и 60ПП, соответственно, $260\text{ HV}_{0,1}$ и $410\text{ HV}_{0,1}$ в переходном слое (подслое) между покрытием и основным металлом. Это связано, по-видимому, с наличием в этой области обезуглероженного слоя, не полностью удалённого в процессе предшествующей обработки. При увеличении расстояния вглубь образца, т. е. вправо от разграничительной линии МН, регистрируется возрастание микротвёрдости с максимумом при $h = 0,6-0,7$ мм, а затем уменьшение до величины, характерной для исходного металла ($260-350\text{ HV}_{0,1}$). Измеренные значения микротвёрдости в максимуме распределения ($590-620\text{ HV}_{0,1}$) свидетельствуют о протекании процессов перекристаллизации в этой области, связанных с релаксацией тепла источника нагрева.

Формирование зон с повышенной микротвёрдостью на расстояниях $h = 0,5-$

$1,0$ мм от поверхности наплавленного покрытия не только увеличивает твёрдость и суммарную глубину упрочнения, но и повышает вероятность возникновения поперечных трещин, зарождающихся в основном металле и продолжающихся в покрытии.

Работоспособность деталей в условиях абразивного и других видов износа зависит от характеристик композиции «покрытие–основной металл», сформированной в приповерхностных слоях в результате плазменно-порошковой наплавки. Наличие слоя с пониженной микротвердостью на границе «покрытие-подложка», с одной стороны, уменьшает износостойкость всей композиции «покрытие-основной металл», но с другой стороны этот слой обладает демпфирующими свойствами, что очень важно при работе упрочнённой детали в условиях ударно-абразивного воздействия. Его плотность растёт, пористость уменьшается, структура становится более однородной. С одной стороны, порошки, имеющие размеры частиц менее 20 мкм , сложно получать (просеивать) и транспортировать в плазменную струю, т.к. мелкодисперсные частицы комкуются и слипаются из-за влажности и сил межмолекулярного сцепления. С помощью сит можно просеивать частицы размерами более 40 мкм . С другой стороны, большая поверхностная площадь мелкодисперсного порошка будет содержать большее количество окислов на поверхности частиц. При использовании порошков, имеющих разный гранулометрический состав, однородность покрытия нарушается из-за большого различия в размерах частиц и, соответственно, разная степень их расплавления и скорости движения в плазменной струе, негативно скажется на пористости покрытия. Использование постоянно-импульсного напряжения для питания плазмотрона (модуляция тока плазмотрона) позволяет интенсифицировать теплообмен между плазмой и напыляемой частицей (скорость плазменной струи будет переменнo-модулированной). Предварительный подогрев напыляемого материала позволяет повысить адгезию покрытия к ос-

нове. Адгезия и пористость наносимых покрытий определяется особенностями и режимами плазменной наплавки порошковых материалов.

В процессе наплавки порошковых материалов, напыляемый слой формируется путем укладки друг на друга частиц материала покрытия, находящихся в оплавленном или расплавленном состоянии. При образовании покрытия частицы деформируются, растекаются и затвердевают. Анализ деформирования показывает, что наносимые частицы располагаются на уже закристаллизовавшихся и остывших до температуры подложки частицы предыдущего слоя. В целом покрытие можно представить, как материал, состоящий из деформированных частиц, соединённых между собой по контактной поверхности, имеющей определённую площадь. Участки схватывания не заполняют всю площадь контакта между частицами, поэтому плотность покрытия ниже плотности материала основы. Данное обстоятельство объясняет наличие пор в наплавленном материале. Размеры напыляемых частиц, а также способность деформироваться на подложке в значительной мере определяют свойства плазменного покрытия и его пористость. С уменьшением размеров напыляемых частиц увеличивается плотность и, соответственно, уменьшается пористость материала покрытия. Установлено, что образованию микротрещин и пор способствует резкое охлаждение напыляемых частиц в процессе формирования покрытия, а также перегрев наплавленного слоя (выше температуры плавления).

Выводы

Известно, что недостаточная износостойкость узлов трения во всех отраслях машиностроения бывшего СССР приводила к ежегодным убыткам, составляющим 18 млрд. рублей [15]. В США подобные потери в результате естественного изнашивания и коррозии составляли (в конце 90-х годов 20 века) ежегодно около 70 млрд. долларов или 4,2 % валового национального продукта [16]. Поэтому во всех промышленно развитых странах большое внимание уделяется развитию и применению различных методов повышения износостойкости

и коррозионностойкой деталей машин, механизмов и строительных металлических конструкций. В области машиностроения часто предполагают применение плазменной наплавки, причем идет непрерывная работа по усовершенствованию, как самих процессов наплавки, так и соответствующего оборудования.

Предлагаемый постоянно-импульсный способ нанесения упрочняющих покрытий позволяет интенсифицировать диффузионный процесс наплавленного материала в поверхность упрочняемой стальной детали, повысить адгезию и, соответственно, прочность нанесенных покрытий. Исследовано влияние режимов постоянно-импульсной наплавки на эти факторы, что позволяет выбирать наиболее рациональные режимы, обеспечивающие высокое качество упрочняющих покрытий и значительно продлить срок их эксплуатации.

Библиографический список

1. Алифанов, А.В. Разработка конструкции плазмотрона на постоянно-импульсном напряжении для наплавки высокопрочных порошковых материалов/А.В. Алифанов [и др.]//Техника и технологии, инновации и качество: Материалы 4-ой МНТК – 19.12.2017, г. Барановичи. – Барановичи, РИО БарГУ, 2018. – С.131-133.
2. Алехнович, В.Н. Разработка наплавочного плазмотрона, работающего на постоянно-импульсном напряжении/ В.Н. Алехнович, А.В. Алифанов, А.М. Милюкова, О.А. Толкачева// Вестник БарГУ. Серия Технические науки. – Выпуск 7. –2019.
3. Алифанов, А.В. Разработка порошкового питателя, позволяющего осуществлять работу наплавочного плазмотрона в постоянно-импульсном режиме// А.В. Алифанов, В.Н. Алехнович, А.М. Милюкова, О.А. Толкачева// Вестник БарГУ. Серия Технические науки. – Выпуск 7. –2019.
4. Фрумин, И.И. Современные типы наплавленного металла и их классификация/ И.И. Фрумин // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный металл: сб. науч. тр. –

- Киев: Наукова думка, 1977. №1. – С. 13 – 17.
5. Плазменное поверхностное упрочнение/Л.К. Лещинский [и др.] – Киев: Техника, 1990. – 195 с.
 6. Астапчик С.А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков. – Минск: Белорус. наука, 2008 – 252 с.
 7. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий плазмой /В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко, О.П. Солоненко// М., 1990. – 244 с.
 8. Плазменное напыление [Электронный ресурс]. — <http://weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding>. – Дата доступа: 12.10.2017.
 9. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин/ И.Н. Шило [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2010. – 320 с.
 10. Рябцев, И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев, Киев: Эко-технология 2004 г.– 160 с.
 11. Электродуговая наплавка металлоповерхностей в среде защитного газа с поперечными колебаниями электрода / В.С. Ивашко [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения

- деталей машин : материалы 10-й Международ. науч.-практ. конф., 15–18 апр. 2008 г.: в 2 ч. – СПб. – Ч. 1. – С. 126–132.
12. Изменение структуры поверхности углеродистых сталей при лазерном модифицировании / В.И. Гуринович [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 2 кн. – Минск, 2013. – Кн. 2. – С. 169–176.
 13. Сидоров, А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А.И. Сидоров. – М.: Машиностроение, 1988. – 188 с.
 14. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки под. ред. В.С. Степанина, Н. Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
 15. Семенов, А.П. О перспективах применения в машиностроении вакуумных ионно-плазменных и газотермических покрытий / А.П. Семенов, Н.А. Воронин // Вестник машиностроения. – 1982. – №1. С. 42-44.
 16. Емельянов, В.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий / В.А. Емельянов, И.А. Иванов, Ж.А. Мрочек // Минск: НПО «Интеграл», 1998 г. – 285 с.

Information about the paper in English

**A.V. Alifanov, V.N. Alekhovich, A.M. Milyukova,
A.I. Mikhlyuk, O.A. Tolkacheva**

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: alifanov_aav@mail.ru
Received 31.05.2019

UNDERSTANDING THE RELATIONSHIP BETWEEN THE CONTINUOUS/PULSE PLASMA COATING MODES APPLIED AND THE QUALITY OF RESULTANT COATINGS

Abstract

The proposed hard-facing technique, which relies on the use of a specially designed plasmatron, can help intensify the diffusion process of the facing material and enhance the adhesion and, thus, the strength of resultant coatings. The developed high-reliability plasmatron has an improved powder feeder. The plasmatron is specifically designed to enable either a continuous powder feed, or the powder can be fed in a pulse, or dosing, mode. The continuous/pulse mode helps reduce the heat impact on the target part and, at the same time, increase the diffusion rate of the hard-facing material. This also saves the need for melting thin-walled parts before hard-facing.

Keywords: plasma-jet hard-facing, hard-face coatings, continuous/pulse mode, adhesion, diffusion, strength



УДК 620.178.6

С.Я. Березин
ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
г. Чита, Россия
E-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru
Дата поступления 21.05.2019

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССАМ РЕЗЬБОВЫДАВЛИВАНИЯ

Аннотация

В статье рассмотрены теоретические положения и результаты экспериментальных исследований контактных напряжений пластического деформирования методом вдавливания остроугольного конического индентора. На основе аналогии с методом вдавливания шарового индентора получена формула для расчета степени пластической деформации при внедрении конуса. Определены основные факторы, влияющие на пластические свойства деформируемых материалов в условиях процессов резьбовыдавливания. Установлены эмпирические зависимости показателей пластических свойств в форме контактных напряжений и пределов текучести от температуры, скорости и степени деформации для основных типов цветных сплавов.

Ключевые слова: резьба, резьбообразование, степень деформации, индентор, контактные напряжения, температура, скорость деформации, глубина вдавливания, твердость материала, конус, шар, пирамида, Бринелль Майер, Шор, Роквелл, цветные сплавы, микротвердость, пластическая твердость.

Введение

Процесс получения резьб пластическим деформированием сопровождается значительными усилиями и крутящими моментами. Для технологического обеспечения таких процессов необходимо иметь данные о контактных напряжениях, возникающих на рабочих поверхностях резьбообразующего инструмента. Контактное напряжение σ_k как расчетный параметр пластических свойств входит в аналитические зависимости силовых показателей процессов обработки резьб давлением. Резьбообразование происходит при разных условиях, сопровождающихся температурой, скоростями, усилиями, степенями деформации. В данной работе рассматривается методика и результаты теоретических и экспериментальных исследований показателей пластичности наиболее распространенных цветных сплавов, в деталях из которых реализуются процессы резьбовыдавливания.

Основная часть

К показателям пластичности металлов можно отнести твердость, предел текучести и сопротивление пластической деформации. С их помощью можно оценивать такие параметры процесса резьбовыдавливания как радиальные усилия, крутящие моменты, остаточные деформации и т.д.

Сопротивление пластической деформации или контактные напряжения, возникающие на деформирующих гранях резьбообразующего инструмента, зависят от прочностных характеристик материала, степени, скорости и температуры деформации [1,2]. Степень деформации определяется схемой формообразования и исследуется применительно к реальным процессам, например, в прокатке [3], резьбовыдавливании [1,4], растяжении, осадке, волочении [2,5] и т.д.

Величины контактных напряжений и степеней деформации в процессах резьбовыдавливания установить достаточно трудно. В основном используется методика оценки глубины упрочнённой зоны путем измерения микротвердости поверхности

шлифов разрезных образцов [1,4]. Задачей исследований является нахождение простого и удобного способа определения контактных напряжений для условий, соответствующих процессам резбоведавливания, т.е. степеней деформации до 0,42 – 0,45, небольших скоростей течения металла – до 50 мм/с, и температур 20 – 200 °С.

Известные методы определения прочностных характеристик в основном основаны на введении различных инденторов в поверхность образцов. Используются сферические, конические и пирамидные формы наконечников инденторов. При этом углы при вершине конических и пирамидных наконечников в основном находятся в пределах 120° – 142°. Все эти методы можно разделить на три группы:

- методы микроиндентирования;
- испытания материалов на твердость;
- определение сопротивления материалов пластической деформации.

Первая группа методов применяется для исследования микротвердости поверхностных слоёв материала [6,7], установления упруго-пластических деформаций [12,13], исследования свойств тонких покрытий [10].

Ко второй группе относятся известные методы испытаний на твердость по Бринеллю, Виккерсу, Роквеллу, Майеру, Шору и др., а также испытания на пластическую твердость [3,11,12].

В обеих группах используются сферические и угловые инденторы, вызывающие образование под ними зон несвободного течения металла в форме так называемого «гидростатического ядра» (по определению Х.Хернот) [9]. Такие инденторы могут не вполне адекватно оценить условия, в котором находится металл в зонах резбоведавливания, т.к. углы деформирующих граней инструмента вполне острые и не превышают 60°.

Третья группа методов ориентирована именно на оценку уровня контактных напряжений (сопротивление пластической деформации) [13,14,15,16].

Во многих работах устанавливается определенная связь контактных напряжений с показателями твердости материала [11,13]. Например, в работе [13] величина

контактных напряжений пластической деформации устанавливалась в зависимости от показателя твердости материала по Бринеллю по упрощенным зависимостям типа:

$$\sigma_K = (1,17 - 1,32) HB, \text{ [кг/см}^2\text{]}, \quad (1)$$

$$\sigma_K = (11,46 - 12,94) HB, \text{ [МПа]}.$$

Для оценки пластических свойств материалов М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин рекомендуют величину пластической твердости HD , которая также связана с величиной HB и получена на основе испытаний материала методом оценки отпечатка от вдавливания шарика [17]:

$$HB = 1,96 \cdot HD^{0,89}, \text{ [МПа]}. \quad (2)$$

где HD – величина пластической твердости.

Значение HD достаточно близко величине σ_K , определенной по формулам (1).

Однако, в реальных процессах пластического деформирования на материал влияют такие факторы как температура в зоне формообразования, скорость деформации и ее степень. Поэтому задачей настоящих исследований было, используя метод вдавливания конического индентора, определить форму более универсальных зависимостей вида:

$$\sigma_K = f(HB, T, V, \psi) \quad (3)$$

где T – температура в деформируемой зоне;

V, ψ – скорость и степень деформации соответственно.

Исследования проводились по методике и с применением оборудования, которые были представлены в работе [14]. Испытуемые образцы устанавливались на специальное приспособление, имеющее внедряемый конический индентор с углом при вершине 80°, усилие на который передавалось от штока пресса через тензометрический динамометр. Одновременно контролировались усилие, глубина внедрения и температура образца.

Предварительно, для получения экспериментальных зависимостей такого типа следовало установить ряд соотношений, а именно:

1. По глубине t и времени τ вдавливания конусного индентора определить среднюю скорость деформации:

$$V_{\tau} = \frac{t}{\tau \cdot \cos \alpha}, \quad \text{мм/с.}$$

2. По глубине вдавливания рассчитать боковую поверхность контакта S и степень деформации ψ , которые определялись на основе геометрических параметров процесса внедрения конуса в материал образца и представленных на рисунке 1:

$$\begin{cases} S = \pi \cdot OB \cdot AB = \pi \cdot (t + h)^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha; \\ \psi = V/V_P, \end{cases} \quad (4)$$

где: h – высота выдавленного металла в виде кольцевого пояса вокруг индентора;

V – объем внедренной части конуса;

V_P – некоторый расчетный объем внедрения, относительно которого степень, определяемая по 2-ой формуле системы (4), будет соразмерна степеням деформации, соответствующим процессам выдавливания метрических резьб $\psi = 0,4\text{--}0,45$.

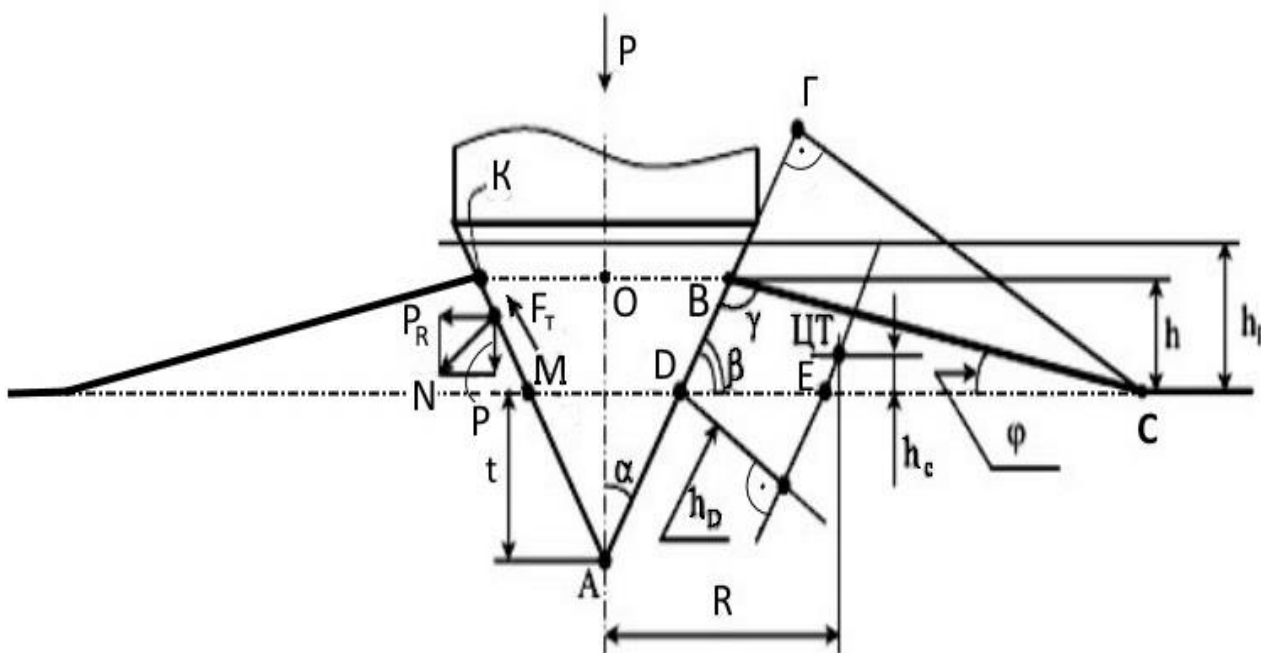


Рисунок 1. Схема процесса вдавливания конусного индентора в поверхность материала образца

Таким образом, глубина внедрения будет являться комплексным расчетным показателем при условии, если определено теоретическое соотношение между ней и высотой h подъема кольцевого наплыва (первая формула системы (4)).

Контактные напряжения, в соответствии с рис. 1, определяются в конце вдавливания из условия:

$$\sigma_K = \frac{P}{S \cdot (\sin \alpha + f \cdot \cos \alpha)}, \quad \text{при } t = t_K, \quad (5)$$

где: P – усилие вдавливания конуса;

S – площадь контакта по боковой поверхности конуса;

α – половина угла конуса при вершине;

f – коэффициент трения в контакте;

t, t_K – текущая и конечная глубина вдавливания.

При вдавливании конуса на глубину t образуется кольцевой наплыв с сечением в виде треугольника DBC . Очевидно, что объем вдавленной части конуса AMD будет равен объему кольцевого наплыва:

$$V_{AMD}^K = V_{DBC}^H. \quad (6)$$

Из системы (4) определим площадь боковой контактной поверхности конуса с

учетом высоты наплыва h . Полный угол конуса при вершине для измерительной установки был принят равным $2 \cdot \alpha = 60^\circ$.

Объем конуса, внедренный от начальной поверхности равен:

$$V = V_{AMD}^K = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot t^3 \cdot \tan^2 \alpha = 0,348 \cdot t^3. \quad (7)$$

Объем кольцевого наплыва можно рассчитать, используя теорему Паппа:

$$V_{DBC}^H = \frac{DC \cdot h}{2} \cdot 2\pi \cdot R = \pi \cdot DC \cdot h \cdot R, \quad (8)$$

где DC – длина основания треугольника DBC ;

R – радиус вращения центра тяжести (ЦТ) треугольника DBC вокруг оси конуса.

Для определения DC необходимо установить значения углов φ и γ треугольника DBC . Выразим через высоту подъема h стороны DC и BC , а далее, по теореме синусов найдем соотношения углов φ и γ :

$$BC = \frac{h}{\sin \varphi}; \quad \frac{DC}{\sin \gamma} = \frac{BC}{\sin \beta};$$

$$DC = h \cdot \left(\frac{1}{\tan \beta} + \frac{1}{\tan \varphi} \right);$$

При $\beta = \pi/2 - \alpha = 60^\circ$ соотношение сторон DC и BC приводит к формуле:

$$\sin \gamma = 0,5 \sin \varphi + 0,866 \cos \varphi,$$

которая справедлива при значении углов $\gamma = 102^\circ 49'$ и $\varphi = 17^\circ 11'$.

Для решения равенства (6) находим сторону DC и радиус R по следующей цепочке вычислений:

$$\begin{cases} DC = h \cdot \frac{\sin \gamma}{\cos \alpha \cdot \sin \varphi}; \\ DB = \frac{h}{\cos \alpha}; \\ BC = t + \frac{h}{\cos \alpha}; \end{cases} \quad (9)$$

$\Pi = DC + DB + BC$ – периметр треугольника.

$$\begin{cases} R = (t + h_C) \cdot \tan \alpha + DE; \\ h_C = \frac{h}{2} \cdot \frac{DB + BC}{n} = 0,5 \cdot h \cdot \frac{t + 2h}{t + 5,389h}; \\ DE = \frac{h_D}{\cos \alpha}; \\ h_D = \frac{\partial D}{2} \cdot \frac{DC + BC}{n} = \frac{DC}{2} \cdot \sin \beta \cdot \frac{DC + BC}{n}. \end{cases} \quad (10)$$

Подставляя значения углов $\alpha, \beta, \gamma, \varphi$ в системы (9,10), находим значения деформируемых объемов (7,8). Приравняв объемы и решая равенство (6) относительно t и h , после преобразований, получаем его окончательный вид:

$$h^4 + 0,062h^3t^2 - 0,0103ht^3 - 0,00192t^4 = 0 \quad (11)$$

При средней глубине внедрения конуса 2 мм, для решения уравнения (11) применим метод подстановки соотношений. Он позволяет получить равенство (12), удовлетворяющее условию (11):

$$h = 0,206t, \quad (12)$$

с учетом чего, формула площади боковой поверхности примет окончательный вид $S = 2,63t^2$.

Расчет степени деформации при вдавливании конуса связан с решением задачи определения расчетной глубины t_p , от которой можно производить отсчет степени деформации. Для этого сравним процесс вдавливания шарика диаметром 10 мм (определение твердости по Бринеллю) с анализируемым процессом.

Степень деформации при вдавливании шара можно определить как отношение объема вдавленной части шара V_C к половине его полного объема $V_{ш}$:

$$\psi = \frac{V_C}{V_{ш}} = 4 \cdot \frac{t^2 \cdot (3/2 \cdot D - t)}{D^3}, \quad (13)$$

где D – диаметр шара.

Объем внедренной части конуса с учетом высоты подъема металла h равен:

$$V_d = \frac{1}{12} \cdot \pi \cdot D_o^2 \cdot (t + h) = 0,193 \cdot \pi \cdot t^3,$$

где D_o – диаметр основания по линии BK (см. рисунок 1).

Степень деформации для конического индентора можно определить в виде:

$$\psi = \frac{t^3}{t_p^3}, \quad (14)$$

где t , t_p – текущая и расчетная глубина внедрения, соответствующая объемам V и V_p . (система 5).

Подставив в формулу (14) среднюю степень деформации для метрических резьб $\psi=0,43$, получим выражение для расчета t_p :

$$t_p = t \cdot \sqrt[3]{\psi^{-1}} = 1,325t.$$

Подставив значение t_p из последней формулы в формулу (14) и приравняв (13) и (14), получим следующее выражение:

$$6t^2D - 4t^3 = 0,43D^3. \quad (15)$$

Введем обозначение $K = \frac{D}{t}$ и при-

ведем выражение (15) к кубической форме:

$$K^3 - 14,02K + 9,346 = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) имеет отрицательный дискриминант и три действительных корня:

$$K_1 = -4,04; \quad K_2 = 3,35; \quad K_3 = 0,69.$$

Какой из двух положительных корней взять за расчетный, покажет характер кривых степеней деформации, изображенных на рисунке 2.

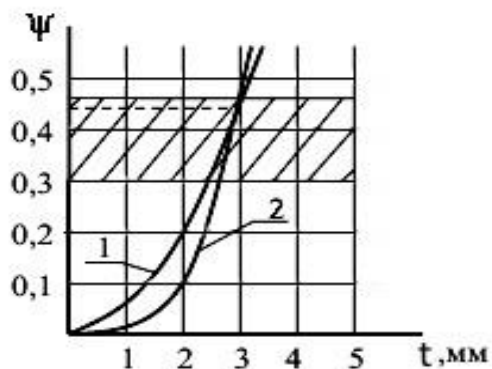


Рисунок 2. Расчетные кривые степеней деформации: 1 – шар; 2 – конус

Кривая 1, соответствующая вдавливанию шарика диаметром 10 мм получена путем расчета степеней деформации по формуле (13). Для построения кривой 2 использовали формулу (14). Обе кривые пересекаются в точке ($t=2,985$ мм; $\psi=0,429$). Это соответствует значению корня K_2 . Заметим, что пересечение кривых, находится в обла-

сти, соответствующей степеням деформации при выдавливании метрических резьб (заштрихована на рисунке 2). Таким образом, предельное значение расчетной глубины вдавливания конуса будет соответствовать величине:

$$t_p = 1,325K_2 = 3,955 \text{ мм}$$

Округлив его до 4 мм, окончательно получены расчетные формулы для проведения экспериментов:

$$\begin{cases} \sigma_K = P / (2,637 \cdot t^2); \\ V_\tau = 1 / (\tau \cdot \cos \alpha); \\ \psi = t^3 / 64, \end{cases} \quad (17)$$

где τ – время вдавливания.

Эксперименты проводились на специальном приспособлении, представленном в работе [14].

Образцы изготавливали из алюминиевых и магниевых сплавов АЛ9, АЛ5, АК4, МЛ 5. Значения определяющих факторов в процессе исследований варьировались в следующих пределах:

$$V\tau = 0,4 - 1,6 \text{ мм/с}; \quad t = 2 - 3,5 \text{ мм};$$

$$T = 20^\circ - 300^\circ \text{C}; \quad \psi = 0,36 - 0,48.$$

В результате статистической обработки данных были получены экспериментальные формулы контактных напряжений в МПа, которые приведены в таблице 1. При подстановке в формулы значений скорости V необходимо учитывать, что это не окружная скорость завинчивания, а скорость внедрения деформирующей грани в металл. Она связана с геометрией заходного витка следующей зависимостью:

$$V = V_0 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \psi \cdot 10^3, \text{ мм/с} \quad (18)$$

где V_0 – окружная скорость.

Значения контактных напряжений можно использовать как для теоретических расчетов силовых показателей процесса резбообразования, подставляя их значения в формулы крутящих моментов, давлений и усилий, так и для оценки пластических свойств цветных сплавов при различных условиях деформирования.

Результаты исследования для сходных условий хорошо согласуются с результатами, полученными в других работах

[1,4]. Однако они более точны в силу одновременного учета трех параметров деформации – V , T , ψ .

В таблице 1 приведены экспериментальные зависимости контактных напряжений от исследуемых параметров, а на рисунке 3 геометрический образ одной из зависимостей для сплава АК 4 в факторном пространстве:

$$\begin{cases} V \Rightarrow [0 \dots 0,45] \text{ мм/с}; \\ \psi \Rightarrow [0 \dots 0,5]; \\ T = 20^\circ \text{C}. \end{cases}$$

Как видим из рисунка 3, скорость и степень деформации оказывают значительное влияние на σ_K . С ростом температуры

сплавов уровень контактных напряжений снижается. На это указывает знак «минус» в экспериментальных формулах. Исследования проводились при трех ступенях температур образцов: 20, 100 и 200 град. С. При повышении степени сопротивление деформации повышается, а при увеличении скорости, наоборот – падает. Влияние независимых факторов на σ_K имеет в основном нелинейный характер и во всем диапазоне факторного пространства разброс значений σ_K весьма широк. В соответствии с рисунком 3 для сплава АК 4 он составляет от 570 МПа до 930 МПа.

Таблица 1

Результаты обработки экспериментов по исследованию контактных напряжений для 4-х марок сплавов

Сплав	Твердость HV , МПа	Плотность γ , г/см ³	Экспериментальные формулы для расчета контактных напряжений σ_K , МПа
АК 4	109-117	2,8	$\sigma_K = 842,9 - 0,45T + 77,7\psi + 527,8\psi^2 - 886,1V + 1092,6V^2$
АЛ 9	60-70	2,66	$\sigma_K = 633,7 - 0,34T + 58,5\psi + 396,8\psi^2 - 666,2V + 821,5V^2$
АЛ 4	45-70	2,65	$\sigma_K = 460,6 - 0,24T + 42,5\psi + 288,4\psi^2 - 484,2V + 597,1V^2$
МЛ 5	24-28	1,8	$\sigma_K = 296,8 - 0,16T + 27,4\psi + 185,8\psi^2 - 312,0V + 384,7V^2$

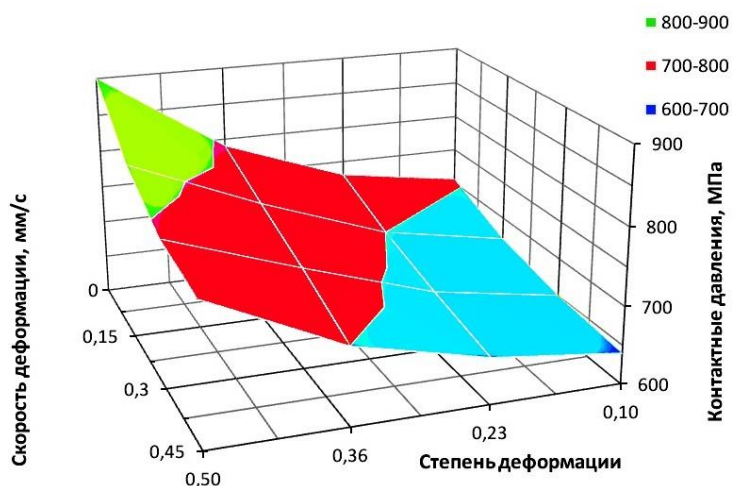


Рисунок 3. Поверхность отклика, соответствующая экспериментальной формуле для сплава АК 4 при нормальной температуре деформации

На основе полученных данных можно установить и другие показатели пластических свойств конструкционных материалов, например, пределов текучести σ_T . Для исходного состояния материалов, т.е. при нормальной температуре, минимальных степенях деформации и скоростях, для всех 4-х марок исследуемых сплавов можно рекомендовать более простые формулы определения пластических свойств:

$$\begin{cases} \sigma_K = 7,93HB + 25,47\gamma; \\ \sigma_T = 0,647HB + 48,38\gamma, \end{cases}$$

где γ – плотность материала (см. таблицу 1).

Заключение

В результате проведенных исследований можно констатировать следующее:

- разработана методика оценки пластических свойств материала путем вдавливания конического индентора с углом при вершине, обеспечивающим свободное течение металла и который не приводит к появлению закрытых областей стеснённой деформации;
- на основе аналогии с процессом вдавливания шарового индентора установлена формула расчета степени деформации для предлагаемого конического индентора;
- получены экспериментальные зависимости для расчета контактных напряжений деформации и пределов текучести марок цветных сплавов, наиболее распространенных в промышленности. Установлен характер влияния физико-механических факторов на их уровень;
- данный метод исследования пластических свойств конструкционных материалов достаточно универсален и может быть распространен на малоуглеродистые стали и даже такие хрупкие материалы как серые чугуны, которые, как показывает опыт, могут выдерживать в малых объемах степени деформации до 0,45.

Библиографический список

1. Получение резьб выдавливающими метчиками / С. И. Велицкий, С. И. Кузурман // Обзоры по межотраслевой тематике Гос. НИИ науч. и техн. информации № 2/41-70. – М.: ГосИНТИ, 1970. – 37 с.
2. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия, 1972. 408 с.
3. Зависимости твердости металлов от степени пластической деформации при различных способах деформирования / В.И.Болобов, В.С.Бочков, С.А.Чупин и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 6. Том 81. С. 52 – 56.
4. Лапин В.В. Контактные напряжения и усилия деформации при прокатке профиля винтовых деталей // Сб. ст. Труды ЛПИ. Серия «Обработка металлов давлением». – 1967. № 287. С. 37 - 46.
5. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургия. – 1978. – 360 с.
6. Sivaram S., Sutharsan K., Jayasinghe J.A., Bandara C.S. Razrabotka sposoba ispytaniya na vdavlivanie dlya ozenki mehanicheskikh svojstv stalnoj armatury [Development of indentation testing metod for evaluation of mechanical properties of steel reinforcement] Injenernoe stroitelstvo i upravlenie stroitelstvom. Materialy 8-i mezhdunarodnoy konferentsii. [8 th International Conference on Structural Engineering and Construction Management. ICSECM2017-105 Sri Lanka, 2017]. Pp.85-93.
7. Broitman E. Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview //Tribology Letters. Springer. (2017). P.18. doi: 10.1007/s11249-016-0805-5.
8. Celentano D., Guelorget B., Francois M. Numerical simulation and experimental validation of the microindentation test applied to bulk elastoplastic materials // Modelling Simulation in Materials Science and Engineering, № 20 (2012)

045007 (32pp). doi:10.1088/0965-0393/20/4/045007.

9. Hernot X., Bartie O. Rasshiraushchaya model polosti, vkluchaiushchaya v sebya pronikaiushchiy i svaynyy efekty [An expanding cavity model incorporating pile-up and sink-in effects]. Zhurnal «Issledovanie materialov». Materialy nauchnogo obshchestva [Journal of Materials Research, Materials Research Society]. № 27(1). January, 2012, pp.132-140.
10. Tunvisut K., O'Dowd N.P., Busso E.P. Ispolzovanie funktsiy masshtabirovaniya dlya opredeleniya mekhanicheskikh svoystv tonkikh pokrytiy iz testov mikrovdavlivaniya [Use of scaling functions to determine mechanical properties of thin coatings from microindentation tests]. Mezhdunarodnyi zhurnal tverdykh tel i konstruktsiy [International Journal of Solids and Structures], № 38, 2001, pp. 335-351.
11. Кузьменко А.Г. Исследование метода индентирования поверхности шаром с определением новых механических характеристик металла // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). Хмельницкий нац. ун-т. Украина. 2011, № 1(59). С.100-114.
12. Пат. 2488806 Российская Федерация, МПК G01N3/42. Способ определения пластической твердости материала образца / М.М.Матлин, А.И.Мозгунова,

С.Л.Лебский, Е.Н.Казанкина, В.А.Казанкин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолГТУ). № 2012106818/28; заявл. 24.02.2012; опубл. 27.07.2013.

13. Сагарда А.А., Чеповецкий И.Х. Мишнаевский Л.Л. Алмазно-абразивная обработка деталей машин. - Киев: Техника, 1974. 162 с.
14. Березин С.Я. Исследование контактных напряжений при резьбообразовании методом вдавливания конического индентора // Технология металлов. 2003. №9. С. 28-31.
15. Семичевский Г.А., Березин С.Я. Технология сборки гладко-резьбовых соединений: Монография. - Чита: ЗабГПУ им. Н.Г Чернышевского. 1998. 100 с.
16. Смирнов С.В., Смирнов В.К., Солошенко А.Н., Швейкин В.П. Определение сопротивления деформации по результатам внедрения конического индентора // Кузнечно-штамповочное производство, 2000, №8. С. 3 – 6.
17. Дрозд М.С., Матлин М.Н., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. - М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

Information about the paper in English

S.Ya. Berezin

Transbaikal State University

Chita, Russia

E-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru

Received 21.05.2019

UNDERSTANDING THE PLASTIC PROPERTIES OF NON-FERROUS ALLOYS IN THREAD FORMING

Abstract

This paper considers the theory and the results of an experimental study of contact stresses occurring during plastic deformation by sharp conical indentation. Using the analogy of ball indentation, the authors came up with a formula for calculating the degree of plastic deformation in the case of conical indentation. The key factors were identified that impact the plastic properties of deformed material during thread forming. Empirical relationships were established that show how contact stresses and yield stresses are governed by the temperature, rate and degree of deformation in application to the main types of non-ferrous alloys.

Keywords: threads, thread forming, degree of deformation, indenter, contact stresses, temperature, rate of deformation, indentation depth, strength of material, cone, ball, pyramid, Brinell Meyer, Shore, Rockwell, non-ferrous alloys, microhardness, plastic hardness



УДК 621.746.047:669.016.2

В.В. Точилкин, О.А. Филатова
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: toch56@mail.ru
Дата поступления 27.05.2019

КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ СТАЛИ, МОДЕРНИЗИРУЕМЫХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ МНЛЗ

Аннотация

Рассмотрено огнеупорное оборудование системы сталеразливочный ковш (СРК) – струя металла (СМ) – промежуточный ковш (ПК) сортовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Рассмотрены процессы управления потоками металла. Отмечены особенности конструкции элементов МНЛЗ, которые обеспечивают рациональное прохождение разливаемого металла в системе СРК – СМ - ПК. Это обеспечило эффективное формирование потоков стали в приемной камере промежуточного ковша сортовой МНЛЗ и создало условия для повышения качества металла и уменьшения брака непрерывно-литых заготовок.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), сталеразливочный ковш, промежуточный ковш (ПК), потоки металла, математическое моделирование, огнеупорные конструкции.

Введение

Промежуточный ковш (ПК) и его устройства, формирующие потоки течения металла в ковше и истечения его в кристаллизатор - важнейшие технологические элементы машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [1, 2]. При разливке стали они в значительной степени определяют стабильность процесса, оказывая большое влияние на повышение качества разливаемого металла. Важным показателем, определяющим качество непрерывно-литой заготовки, является содержание неметаллических включений (НВ) в стали. Существует ряд способов, позволяющих повысить чистоту металла по НВ. Один из них - рафинирование стали в ПК [3].

Основная часть

Для этого современные ПК снабжаются оборудованием для регулирования потоков металла. В настоящее время в электросталеплавильном цехе (ЭСЦ) ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) функционируют две сортовые пятиручьевые МНЛЗ с расстоянием между ручьями 1250 мм. На введенных в

эксплуатацию машинах используют Т - образный ПК (рисунок 1). В связи с конструктивными особенностями данного ПК затруднено использование типичных рафинирующих устройств, поэтому возникла необходимость в разработке специальных рафинирующих устройств, которые бы создали благоприятные условия для всплытия НВ [4].

Разработан ПК, в конструкциях элементов которого учитываются особенности движения потоков стали в его рабочем пространстве [5]. Разработанные элементы ПК позволяют более эффективно формировать восходящие потоки стали, что и обеспечивало быстрое всплытие НВ и увеличение времени пребывания стали перед истечением из ПК.

На рисунке 2 представлен многогранный огнеупор приемной камеры с выемкой [5].

Металл из сталеразливочного ковша поступает в ПК, где перемещается из приемной камеры в разливочную камеру и далее через разливочные стаканы в кристаллизатор [6, 7]. При поступлении металла в приемную камеру часть его потока перемещается ко дну камеры и через отверстия

многогранного огнеупора поступает в разливочную камеру [8].

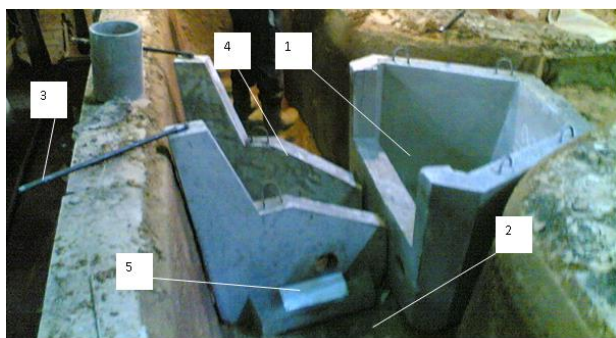


Рисунок 1. Комплект оборудования Т-образного ПК

- 1 – приёмная камера, оснащенная многогранным огнеупором; 2 – разливочная камера; 3 – трубопровод для подачи аргона; 4 – комплект оборудования СРП; 5 – боковой элемент блока

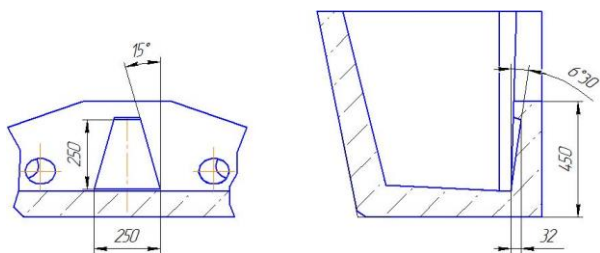


Рисунок 2. Разработанная конструкция многогранный огнеупор приемной камеры с выемкой

Для оценки работы модернизируемого ПК оснащенного многогранным огнеупором с выемкой и определения его рациональных размеров, было проведено моделирование движения потоков стали.

Задачу решали путем математического моделирования [8], при этом был описан и смоделирован процесс движения потоков стали в объеме системы: сталеразливочный ковш – приемная камера ПК.

Математическая модель была основана на уравнении Навье-Стокса для жидкого металла и уравнения неразрывности потока для несжимаемой жидкости [8].

Соответствующие уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}, \\ \rho \nabla \vec{u} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{u}$ – вектор скорости жидкости; $\vec{F}$ – вектор объемных сил; p – давление жидкости; ∇p – градиент давления; ν – коэффициент кинематической вязкости; $\nabla^2 \vec{u}$ – лапласиан $\vec{u}$; ρ – плотность стали.

В математической модели были сделаны допущения [9]:

1. Плотность каждой фазы (металла и НВ) в модели постоянна.
2. Объем сталеразливочного ковша изначально заполнен сталью полностью.
4. Объем ПК изначально заполнен сталью.
5. Жидкость – сталь, является вязкой и несжимаемой.

Было проведено математическое моделирование потоков жидкого металла с целью оценки влияния конструкции многогранного огнеупора приемной камеры ПК на движение потоков металла [3, 5].

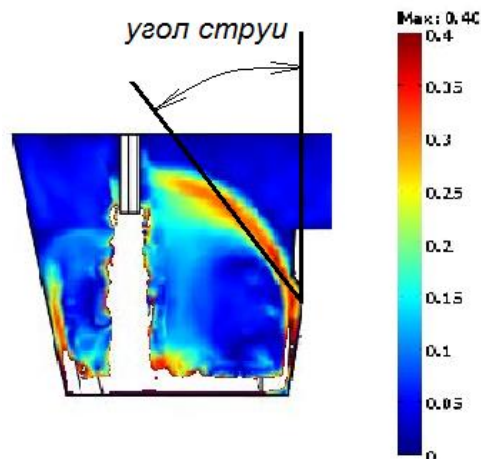
При этом необходимо выполнение условия работоспособности: скорость стали на границе раздела металл-шлак не должна превышать допустимой скорости, т.е.

$$u_i \leq [u_i],$$

где u_i – скорость стали на границе раздела металл-шлак, м/с; $[u_i]$ – допустимая скорость на границе раздела металл-шлак, м/с.

На рисунке 3 представлена картина движения потоков стали в приемной камере ПК, оснащенного многогранным огнеупором.

По результатам моделирования была получена зависимость влияния угла наклона боковых граней выемки на значение максимальной скорости на зеркале металла. График зависимости представлен на рисунке 4. Рациональным значением угла наклона боковых стенок выемки, согласно результатам моделирования, является угол (β) находящийся в диапазоне - $14^\circ \div 17^\circ$, при этом наблюдаются минимальные значения скоростей.



а

б

Рисунок 3. График зависимости угла струи от угла выемки
а - график изменения угла наклона струи, выходящей на поверхность раздела шлак – сталь;
б – картина движения потоков стали в приемной камере ковша

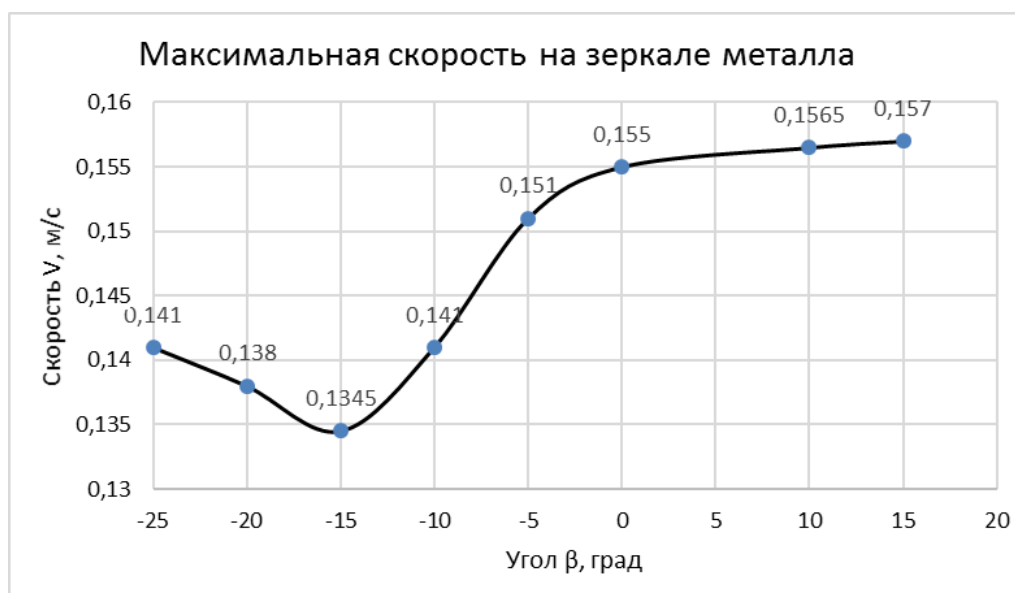


Рисунок 4. График зависимости максимальной скорости U на зеркале металла от угла наклона (β) выемки

Заключение

1. Струя металла из СРК воздействует на боковую поверхность ПК. Это приводит к интенсивному размыву поверхности ПК по всей высоте.
2. Струя металла, поступающая через защитную трубу в приемную камеру ПК, создает скоростные (более 0,2 м/с) вертикальные восходящие и интенсивные боковые потоки металла в сторону борта ПК.
3. В приемной камере ПК наблюдаются потоки металла со скоростью больше

допустимой. Это приводит к захвату НВ на поверхности раздела шлак–сталь приемной камеры и даже оголению зеркала металла.

4. Применение защиты приемной камеры ПК с выемкой, имеющей рационально выбранные углы наклона, позволит снизить воздействие потоков жидкого металла на боковую поверхность ковша и уменьшить скорость потока стали на поверхности сталь-шлак до допустимых значений. Это будет способствовать: снижению размыва торкрет-массы

борта ПК; исключению аварийных ситуаций при разливке стали на МНЛЗ; стабильности процесса непрерывной разливки; повышению качества разливаемой жидкой стали.

Библиографический список

1. Inclusion removal in a tundish by gas dubbing / J. P. Rogler, L. J. Heaslip, M. Mehrvar // Can. Met. Quart. - 2004. - Vol. 43, № 3. - P. 407-415.
2. Оптимизация гидродинамических характеристик промежуточного ковша УНРС с целью удаления экзогенных неметаллических включений / А. В. Куклев, В. В. Тиняков, Ю. М. Айзин [и др.] // Metallurg. - 2004. - № 4. - С. 47-49.
3. Вдовин К. Н., Точилкин В. В., Ячиков И. М. Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок: монография. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. - 348 с.
4. Vdovin K. N., Tochilkin V. V., Yachikov I. M. Designing refractories for the tundish of a continuous caster // Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Vol. 56. №6. P. 569-573. DOI:10.1007/s11148-016-9889-6
5. Патент на полезную модель 91016 РФ, МПК В22D 41/00. Промежуточный для непрерывной разливки металла / Ушаков С.Н., К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин и др. Заявка 2009137813. Заявл. 12.10.2009; Опубл. 27.01.2019.
6. Разработка конструкции огнеупорных элементов для рафинирования стали при непрерывной разливке / В. В. Числавлев, С. В. Фейлер, Д. В. Бойков и др. // Новые огнеупоры. 2017. № 11. С. 22-26.
7. Gushchin, V. N. Improved tundish refining of steel in continuous-casting machines / V. N. Gushchin, V. A. Ul'yanov // Steel in Translation. - 2017. - Vol. 47, № 5. - P. 320-324. DOI: 10.3103/S0967091217050060.
8. Analysis of the Process of Metal Casting and the Structure of Refractory Equipment of the "Tundish Ladle - Submerged Nozzle - Crystallizer" System of a Section CBCM / Victor V. Tochilkin, O.A. Filatova, V.I. Umnov [et al.] / Refractories and Industrial Ceramics. 2018. Volume 59, No. 1, pp. 6-9.
9. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. - М.: Новые технологии, 2004. - 784 с.

Information about the paper in English

V.V. Tochilkin, O.A. Filatova

Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russian Federation

E-mail: toch56@mail.ru

Received 27.05.2019

DESIGN OF STEEL DISTRIBUTION SYSTEM COMPONENTS IN RETROFITTED CONTINUOUS CASTER TUNDISH LADLES

Abstract

This paper examines the refractory components of the system Ladle – Metal Stream – Tundish Ladle of continuous billet casters and how to manage the metal streams in it. The authors point out certain design components of continuous casters that ensure efficient passage of metal through the above system. This ensured efficient forming of metal streams in the inlet chamber of the tundish and creates conditions for steel quality enhancement and a lower rejection rate among continuously cast billets.

Keywords: continuous caster, ladle, tundish ladle, metal streams, mathematical modelling, refractory structures.



УДК 67.02

И.В. Горлов, Е.В. Полетаева
ФГБОУ ВО «Тверской государственный
технический университет»
г. Тверь, Россия
E-mail: gorloviv@yandex.ru
Дата поступления 21.05.2019

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ДЕТАЛИ – ОСНОВА СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Аннотация

Основная проблема большинства машиностроительных предприятий в нашей стране – сокращение производства. В настоящее время увеличение объёма производства возможно только за счёт расширения его номенклатуры, что требует ускоренной технологической подготовки. Данную проблему можно решить за счёт применения групповых технологий и использования систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП). Однако использование САПР ТП не всегда обеспечивает требуемое решение, так как конкретные особенности производства не всегда учитываются автоматизированными системами. Решение этой проблемы возможно на основе специального алгоритма, позволяющего путем анализа структурной модели конструкторско-технологических элементов (КТЭ) детали получать требуемый технологический процесс (ТП) с учетом конкретных условий производства. Такие технологии могут быть реализованы за счет гибких производственных систем (ГПС), что позволит существенно снизить затраты на переналадку при переходе на выпуск нового изделия.

Ключевые слова: технология машиностроения, автоматизация, технологическая подготовка производства, структурная модель, групповая технология, гибкие производственные системы.

Введение

Большинство машиностроительных предприятий в условиях сокращения объёма производства традиционной продукции часто вынуждено расширять номенклатуру выпускаемых изделий за счет реализации дополнительных заказов на изготовление нетрадиционных изделий. В этом случае возникает потребность разработки гибких технологических процессов. Однако, при изготовлении деталей относительно малой серийности как правило применяют универсальные станки, не обладающие необходимой в настоящее время эффективностью. Эффективность многономенклатурного производства сегодня может быть повышена только на основе групповых технологий [1-3], основанных на применении станков с числовым программным управлением (ЧПУ), обладающих требуемой

гибкостью и производительностью. При реализации такого подхода наиболее актуальной является задача автоматизированного структурного синтеза ТП с использованием систем автоматизированного проектирования технологических процессов для получения технологических маршрутов на основе анализа структурной модели детали и свойств КТЭ. В то же время в большинстве применяемых в настоящее время САПР ТП не решена на требуемом уровне проблема создания сквозного технологического маршрута изготовления детали [4, 5]. Решить эту проблему можно с помощью разработки специальных алгоритмов, которые позволяют формировать технологический процесс автоматизированным способом на основе анализа структурной модели детали и свойств КТЭ.

Структурная модель детали

Структурная модель строится на основе конструкторских и технологических свойств детали. В процессе анализа детали необходимо выявить основные параметры, влияющие на положение заготовки в процессе обработки, способ получения поверхностей и доступ обрабатывающего инструмента в зону резания. Исходя из этих параметров, деталь как системный объект можно представить подсистемами на нескольких уровнях абстрагирования.

Для деталей типа вал их структурную модель условно можно представить двумя подсистемами первого уровня: левая сторона и правая сторона. Это связано с тем, что при изготовлении большинства валов обработка проводится последовательно сначала с одной стороны, а после переустановки детали, – с другой. При рассмотрении конкретной детали необходимо учитывать последовательность обработки поверхностей (чаще всего от наименьшей к наибольшей) и способ её установки. При этом надо стремиться к тому, чтобы, если возможно, время обработки сторон было близким, но это правило необязательно. Наиболее важным является требование установки детали с учетом необходимой точности базирования.

Далее, подсистемы первого уровня (левая и правая сторона) делятся на подсистемы второго уровня в зависимости от основного формообразующего элемента, что связано с формой обрабатываемой поверхности и соответственно видом используемого технологического оборудования. Для валов основное формообразующее движение – вращение детали относительно своей оси, и поэтому для обработки таких деталей, как правило, используют токарные и круглошлифовальные станки в соответствии с требуемой точностью обрабатываемых поверхностей. Кроме того, необходимо учитывать дополнительные КТЭ (лыски, пазы, несоосные отверстия и др.), которые получают с помощью других способов обработки. С точки зрения расшифровки структурной модели детали, подсистемы второго уровня предпочтительно обозначать в соответствии с видом основ-

ного формообразующего элемента (цилиндры, конусы, шпоночные пазы, торцы и др.).

На самом нижнем уровне структурной модели находятся конструкторско-технологические элементы – простейшие поверхности с набором различных свойств, наиболее важные из которых: размеры, точность, шероховатость поверхностей, отклонения формы и расположения поверхностей. Данные свойства отразить в структурной модели сложно, однако, большинство из них косвенно связаны между собой. Так, для цилиндрической поверхности с точностью основного размера по шестому - седьмому качеству возможная шероховатость поверхности изменяется в пределах $Ra_{1,6-0,2}$ в зависимости от конкретных требований к детали. Требуемая шероховатость достигается в основном за одинаковое количество переходов и зависит в конечном итоге от параметров инструмента и режимов резания, то есть от параметров обработки, и, следовательно, на структуру технологического процесса не влияет. Отклонения формы получаемой поверхности косвенно связаны с допуском на основной размер, следовательно, могут быть определены в зависимости от его качества точности. Таким образом, в большинстве случаев, номер качества определяет необходимое количество переходов для достижения требуемых параметров детали, то есть позволяет определять структуру технологического процесса.

Обозначение КТЭ можно представлять в виде:

123Цил6,

где цифры вначале отражают структурные свойства элемента: *1* – первый структурный уровень (обрабатываемая сторона детали), *2* – второй структурный уровень (главная формообразующая группа, в данном случае цилиндр), *3* – третий структурный уровень (номер элемента, входящего в формообразующую группу). Буквы в обозначении определяют основной формообразующий элемент, а цифра в конце обозначения *6* – качество точности основного размера элемента.

Проведем структурный анализ детали типа вал. Шлицевой вал (Рис.1) представляет собой набор цилиндров, диаметральный размер которых уменьшаются от середины к торцам. Наибольший диаметральный размер 54 мм, длина вала 250 мм. Структурно вал можно разделить на системы трех уровней. Первый структурный уровень связан со стороной обрабатываемой детали (условно, левая сторона – 1, правая сторона – 2).

Второй структурный уровень объединяет основные формообразующие поверхности, зависящие от способа обработки. Структурная группа второго уровня 1.1 – торец с центровым отверстием, он обрабатывается на фрезерно-центровальной операции за два перехода (первый переход – фрезерование торцов, второй переход – сверление центрового отверстия). Структурная группа второго уровня 1.2 – цилиндр, который последовательно обрабатывается несколько раз. На первом этапе обработки (черновая обработка) получается непосредственно сам цилиндр и правый торец. Аналогично обозначены другие структурные подсистемы второго уровня (Рис. 2). Группирование КТЭ в подсистемы второго

уровня производится с точки зрения обработки в пределах одной операции и последовательности их обработки.

На третьем структурном уровне детали находятся КТЭ, обладающие как своими, так и свойствами более высоких структурных уровней (рисунок 3).

Например, КТЭ 1.3.2.Цил6 – цилиндр шестого качества входящий в структурную подсистему второго уровня 1.2 Цилиндр принадлежащей структурной системе первого уровня 1 Левая сторона. Проведя анализ конструкции детали по предложенным принципам, получим структурную модель, отражающую все свойства шлицевого вала (см. рисунок 1).

Аналогичным образом производится структурный анализ соответствующих деталей, входящих в группу и формируется комплексная деталь, содержащая все КТЭ деталей. На основе анализа структуры КТЭ группы формируется групповой технологический маршрут, представляющий собой набор операций с выбранным технологическим оборудованием, отвечающим требованиям групповой обработки.

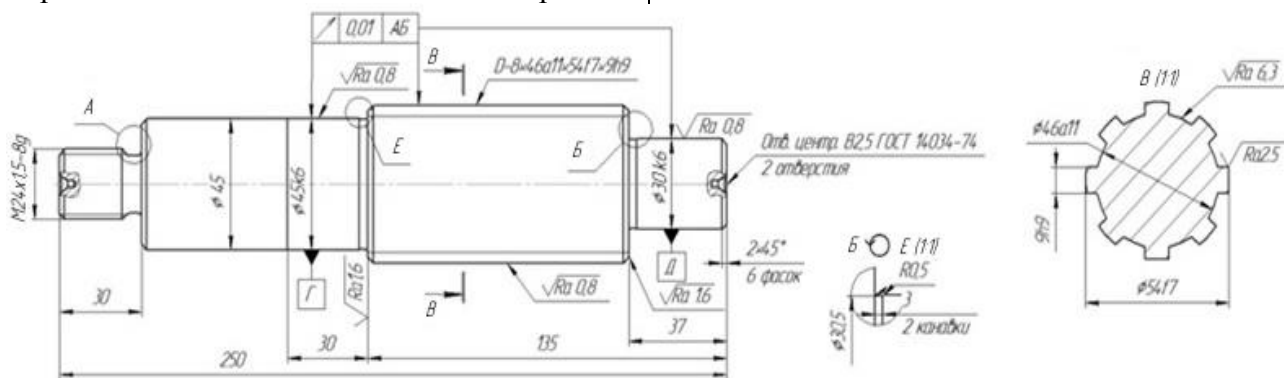


Рисунок 1. Шлицевой вал

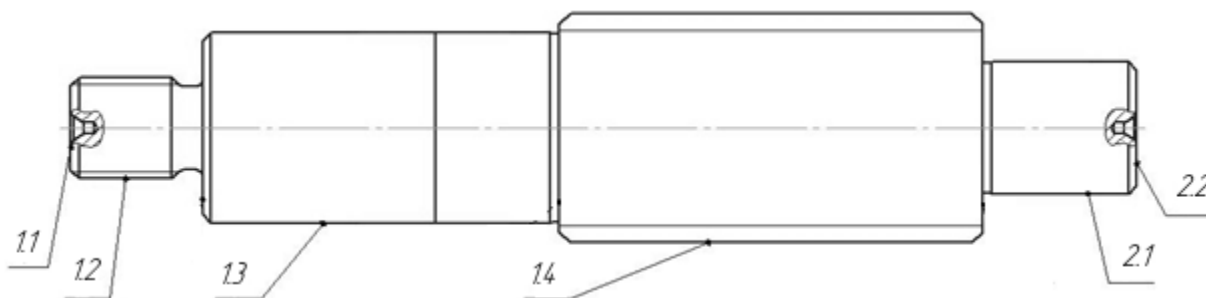


Рисунок 2. Основные структурные группы второго уровня шлицевого вала

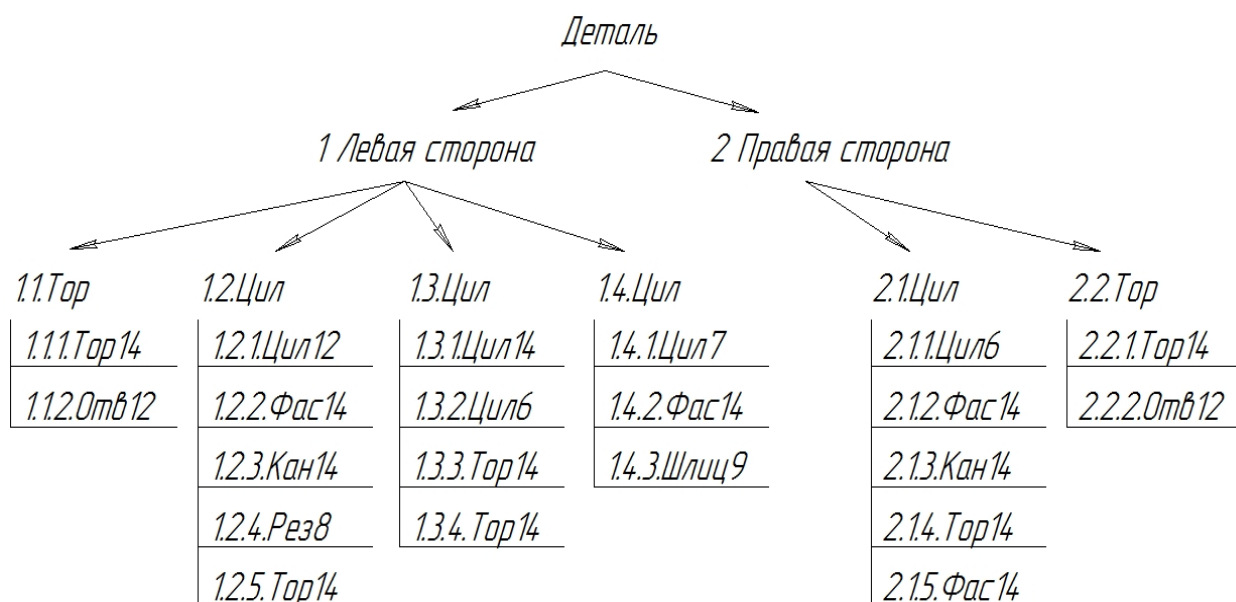


Рисунок 3. Структура КТЭ детали шлицевой вал

Формирование технологического процесса для детали типа вал

Для повышения эффективности технологический процесс в многономенклатурном производстве строится на групповом принципе. Такие ТП формируются из условий серийного производства с разделением на операции подготовки технологических баз, черновые, чистовые и изготовление соответствующих КТЭ (фрезерование шпоночных пазов, шлицев, зубчатых венцов, сверление несоосных отверстий и др.). Далее, при необходимости, проводится термообработка, а затем отделочные операции. Групповой технологический процесс для изготовления деталей типа *вал* структурно в целом для всех деталей сходный [6, 7]. Таким образом, укрупненная структура ТП известна.

Оборудование для реализации групповой технологии подбирается исходя из условий достаточной гибкости и эффективности [8-10]. Таким требованиям отвечают станки с ЧПУ. Для подготовки технологических баз в многономенклатурном производстве в настоящее время применяются фрезерно-центровально-обточные станки, которые оснащаются управляемыми по программе специальными устройствами для обработки различных поверхностей, установки и закрепления однотипных дета-

лей. NPF120N станок для подготовки технологических баз, который используется для одновременной обработки с двух сторон торцов, сверления с двух сторон центровых отверстий и одновременного обтачивания крайних цилиндрических поверхностей (длиной до 50 мм).

Далее в большинстве случаев выполняется токарная черновая обработка. Для этих целей не требуется оборудование с широкими технологическими возможностями, т.к. форма обрабатываемых поверхностей простая (цилиндры, торцы, конуса и др.). При этом станки, используемые на черновой обработке (например, ТС1625Ф3) должны быстро перенастраиваться, обладать высокой мощностью и жесткостью, что обеспечивает удаление больших припусков за один проход. Однако, вследствие высоких нагрузок достигаемая точность обработки относительно невысока (14 - 12 квалитет).

Для токарных чистовых операций, где обычно совмещаются получистовые и чистовые переходы (11 и соответственно 9 квалитет), требуются станки с более широкими технологическими возможностями (например, ТС1720Ф4), так как обработка проводится за несколько проходов с получением фасок, канавок различной формы, резьбы и др., с возможностью использования нескольких инструментов.

Затем получают другие элементы детали – шлицы, зубчатые венцы, пазы, отверстия и др. Для этого можно использовать обрабатывающие центры на базе вертикально-фрезерных станков (например, ФС85МФ3). Такие станки могут проводить различные виды обработки: фрезерование, растачивание, сверление, резбонарезание и др. Для расширения возможностей таких станков используют цифровые делительные головки, что обеспечит изготовление зубчатых венцов, шлицев методом копирования и др.

При большом количестве зубчатых венцов или шлицев для повышения эффективности обработки предпочтительнее применять специализированные зубофрезерные станки с ЧПУ (например, 53С11Ф5).

Такой станок может использоваться для изготовления цилиндрических и червячных зубчатых колес, относительно коротких шлицевых поверхностей в условиях мелкосерийного производства.

Отделочные операции в групповом производстве для деталей типа вал необходимо проводить с помощью круглошлифовальных станков с ЧПУ (например, RSM 500 CNC). Назначение таких станков – обработка шлифованием наружных цилиндрических, конических поверхностей в разном их сочетании. Шлифование может проводиться методом врезания или продольного шлифования с последовательной обработкой нескольких поверхностей.

Таблица 1

Фрагмент массива промежуточных состояний КТЭ

	КТЭ	Раз- мер	Переходы								
			Фр-центр	Ток. черн.	Ток. пол. чист.	Ток. чист.	Фрезерн.	Зубо. фрез	Кр. шлиф. предв.	Кр. шлиф. оконч.	...
1	<i>1.1.1.Тор14</i>	30js14	14	0	0	0	0	0	0	0	
2	<i>1.1.2.Отв12</i>	12js12	12	0	0	0	0	0	0	0	
3	<i>1.2.1.Цил14</i>	24h12	14	0	0	0	0	0	0	0	
	...										
8	<i>1.3.1.Цил14</i>	45h14		14	0	0	0	0	0	0	
9	<i>1.3.2.Тор14</i>	Ø34h6		14	11	9	0	0	7	6	
	...										

Количество и технологические возможности оборудования в конкретных условиях производства могут существенно отличаться, поэтому на этапе технологического проектирования требуется за каждым станком закрепить возможные КТЭ, что позволит в дальнейшем автоматически получить маршрут обработки на конкретную деталь.

Большое количество САПР ТП позволяют по свойствам КТЭ получать планы их обработки с выбором способа изготовления элемента, межоперационных размеров и допусков. При таком подходе может быть сформирован массив промежуточных состояний для каждого конструкторско-технологического элемента детали, который в последующем используется для синтеза технологического процесса (таблица 1).

Количество переходов и их последовательность могут быть разными в зависимости от параметров КТЭ и структуры группового технологического процесса. Для каждого КТЭ в строке промежуточного состояния в соответствующем переходе указывается достигаемая точность обработки (структурная часть обозначения КТЭ и формообразующий элемент не показываются).

Для каждого станка формируется вектор, который при перемножении на строку промежуточного состояния КТЭ (в пределах переходов) может давать нулевое множество, – данный элемент на соответствующей операции не обрабатывается, или ненулевое множество, – элемент на данной операции обрабатывается. Один и тот же станок может использоваться на операциях при обработке с разных сторон, поэтому при синтезе ТП условно нужно выбирать, сначала операцию при обработке со стороны 1, а потом 2, если это необходимо.

Например, для фрезерно-центровального станка NPF120N и соответствующей операции вектор представлен в таб.2.

Таблица 2

Вектор станка NPF120N

1	0	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---

При перемножении данного вектора на строки 1, 2 и 3 будет получаться непустое множество, значит элементы *1.1.1.Тор14*, *1.1.2.Отв12* и *1.2.1.Цил14* будут обрабатываться на данной операции.

Аналогично для токарной черновой операции со стороны 1. Станку TC1625Ф3 будет соответствовать вектор, представленный в таб.3.

Таблица 3

Вектор станка TC1625Ф3

0	1	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---

На токарной черновой операции со стороны 1 будут обрабатываться элементы *1.3.1.Цил14*, *1.3.2.Цил14*, *1.4.1.Цил14*, *2.1.1.Цил14*.

Используя представленный алгоритм можно автоматизированным способом получать технологический процесс на любую деталь группы.

При разработке технологического процесса эффективно использовать САПР ТП, так как с помощью них можно повысить качество и существенно сократить время технологического проектирования. Например, при проектировании в системе «Вертикаль» в окне «КТЭ» создаётся структурная модель детали по описанным выше правилам. Для КТЭ описываются свойства (размер с точностью, шероховатость), и автоматически формируются варианты планов обработки. Из них выбирается вариант, соответствующий структуре группового техпроцесса. Выбранный план обработки с межоперационными размерами позволяет определить необходимый набор операций для получения данного КТЭ и сформировать его обозначение в окончательном виде по предложенной выше методике.

Процесс создания структуры группового ТП зависит от большого количества параметров (структурных моделей КТЭ деталей группы, используемого технологического оборудования, применяемой оснастки и многих других условий), поэтому для сравнения возможных ТП в конкретном случае необходимо проводить предварительный анализ на имитационных моделях.

Заключение

Групповые технологические процессы изготовления деталей малой серийности позволяют повышать эффективность многономенклатурного производства за счёт уменьшения времени на переналадку станков [11-14]. В то же время, подготовка к производству детали малой серийности оказывает существенное влияние на стоимость и качество изделия. Отчасти эту проблему помогают решить САПР ТП, однако, они не всегда обеспечивают получение готового решения на высоком технологическом уровне, так как имеют ряд ограничений. Разработанная методика построения технологического процесса на основе анализа структурной модели детали позволяет упростить процесс получения технологического маршрута автоматизированным методом за счет формального алгоритма, который может быть реализован с помощью информационных систем, что обеспечивает повышение качества проектирования, и снижение затрат времени на подготовку к производству.

В условиях, когда машиностроительные предприятия снижают объём производства традиционной продукции, возрастают издержки при использовании типовых решений. Использование ГПС на основе групповых технологий и современные подходы к проектированию технологических процессов для деталей малой серийности позволяют обеспечить требуемую эффективность изготовления и высокое качество продукции [15].

Библиографический список

1. Горлов И. В., Полетаева Е.В., Калинин Н.А. Групповая технология как основа автоматизации широкономенклатурного производства // Вестник Тверского государственного технического университета. Тверь. 2016. №1 (29). С. 59 – 65.
2. Горлов И.В., Полетаева Е.В., Рахутин М.Г. Использование групповых технологий при производстве и ремонте торфяных машин // Механическое оборудование металлургических заводов. 2017. №2 (9). Магнитогорск. Магнитогорский государственный университет им. Г.И. Носова. С.22-26.
3. Организация группового производства /Под ред. С.П.Митрофанова. –Л.: Лениздат, 1980. -288с
4. Литовка Ю. В. Автоматизация технологической подготовки производства Тамбов: Тамбовский государственный технический университет. 2003. 33 с.
5. Чижов М. И., Бредихин А.В. Разработка подхода к автоматизации технологической подготовки производства в PLM системе Teamcenter // Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж. 2011. Т. 7, № 12-1. С. 24 – 26.
6. Новоселецкий Б.В., Редько Р.Г., Редько О.И. Особенности технологии обработки деталей типа тел вращения на гибких автоматизированных линиях // Луцкий национальный технический университет. Луцк. 2014. № 47. С. 125-130.
7. Аскалонова Т.А., Леонов С.Л., Ситников А.А. Организация групповой технологии в гибких производственных системах // Вестник современных технологий. Севастополь. 2016. №1 (1). Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет». С. 4 – 9.
8. Мещерякова В. Б, Стародубов В. С. Металлорежущие станки с ЧПУ Сер. Бакалавриат: учебное пособие. Москва. Московский государственный

технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2015. 336 с.

9. Сивцев Н.С. Приспособления для многооперационных станков с ЧПУ: учебное пособие для студентов вузов: в 2-х частях Редактор: И. В. Ганеева. - Том. Часть 1. Системы переналаживаемых приспособлений. Ижевск. Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 2014. 96 с.
10. Пушинин В. Н., Ерохин И. А., Корнев Д. Ю., Скиба В. Ю. Станочное оборудование, основанное на компенсировании нескольких технологических операций // Актуальные проблемы в машиностроении. Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск. 2014. № 1. С. 245 – 255.
11. С. Синго. Быстрая переналадка. Революционная технология оптимизации производства. Серия «Модели менеджмента ведущих корпораций». Перевод с английского под ред. Ю.Адлера. Москва, ЦентрОргПром. 2006. 343 с.
12. Мартынов Р.С. Сокращение времени переналадки оборудования как фактор

повышения эффективности использования материальных ресурсов на предприятии // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2011. С. 87-90.

13. Куприянова Т.М., Растимешин В.Е. Реализация технологии быстрой переналадки: российский опыт info@tpmcenter.ru
14. Звягина Е.А., Миронов А. Оптимизация процесса механической обработки детали на основе применения быстро-переналаживаемого технологического оборудования // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции: в 3-х томах. ответственный редактор Горохов А.А. Издательство: Закрытое акционерное общество "Университетская книга" (Курск), 2014. С. 224 – 229.
15. Бухалков М. И., Кузьмин М. А., Павлов В.В. Особенности проектирования и организации группового производства в машиностроении // Организатор производства. Воронежский государственный технический университет. Воронеж. 2010. Том: 47 № 4 С. 27-32.

Information about the paper in English

I.V. Gorlov, E.V. Poletaeva
Tver State Technical University
Tver, Russia
E-mail: gorloviv@yandex.ru
Received 21.05.2019

STRUCTURAL MODEL OF A PART AS THE BASIS FOR PROCESS SYNTHESIS

Abstract

The main issue faced by the majority of machine building companies in this country is related to scaling down. At present, the only way to scale up the production is to broaden the assortment of manufactured items, which requires fast staging. The problem can be resolved by using group technology and computer-aided process planning. However, computer-aided process planning systems do not always deliver the desired solution as certain production conditions cannot always be accounted for by automation systems. This problem can be resolved with the help of a special algorithm, which analyses the structural model of a part's design and produces the required process based on the actual production environment. Such technology can be realized with the help of flexible production systems, which will help significantly reduce setup costs when changing over to new product.

Keywords: machine building technology, automation, process engineering, structural model, group technology, flexible production systems.



УДК 621.7

Л.С. Белевский, Р.Р. Дема,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
университет им. Г.И. Носова
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: demarr_mgtu.ru@mail.ru

М.А. Леванцевич,
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: levancev@mail.ru

Е.В. Пилипчук, Е.Л. Юроть
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: zhan-09@rambler.ru
Дата поступления 05.06.2019

В авторской редакции

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ И НАНЕСЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ПРОВОЛОЧНЫМИ ЩЕТКАМИ

Аннотация

Рассмотрен процесс упрочнения металлической поверхности с одновременным нанесением функциональных покрытий гибким инструментом – вращающимися проволочными щетками (ВПЩ). Этот процесс, впоследствии названный фрикционным плакированием (ФП), впервые начал исследоваться в середине 80^х годов прошлого века в Магнитогорском горно-металлургическом институте им. Г.И. Носова. Процесс ФП реализуется на токарных, шлифовальных и других металлорежущих станках с использованием простой оснастки или ручных углошлифовальных машин (УШМ). При металлографическом исследовании поверхностных слоев в качестве исследуемых образцов использовали пластины 3х20х100 мм из стали марки 08. Покрытия наносили на плоскошлифовальном станке, на который вместо абразивного круга устанавливалась ВПЩ и приспособление для подачи материала покрытия. Цилиндрические образцы (сталь марки 50) диаметром 20 мм обрабатывали на токарном станке, на суппорт которого устанавливалось приспособление с УШМ. Для металлографических исследований использовали оптические микроскопы и растровый электронный микроскоп РЭМ JSM-6490 LV. Электронно-микроскопические исследования проведены методом реплик на электронном микроскопе «TESLA BC-613». Измерения и анализ шероховатости проводились по методике стандарта ГОСТ Р ИСО 25178 на установке Contour GT K1 (Bruker). Средняя толщина покрытия составляет 20-25 мкм, размеры частиц 0,3-0,6 мкм. Проведены исследования микроструктуры и свойств функциональных покрытий, сформированных после обработки поверхности изделий методом ударно-фрикционной обработки гибким инструментом. Установлено, что данная обработка обеспечивает получение твердого наноструктурированного поверхностного слоя, с размером фрагментов до 0,13 мкм подобно тому, как это достигается при интенсивной пластической деформации. Установлено, что использование электрического тока интенсифицирует процесс, при этом существенно увеличивается толщина покрытия и его пластичность. Нанесение медьсодержащего покрытия на штоки и плунжеры гидравлики позволило увеличить срок службы в 1,4-3 раза, на зубья колес волновых передач торцевого исполнения в 6 раз.

Ключевые слова: фрикционное плакирование, ударно-фрикционное плакирование, электрофрикционное плакирование, гибкий инструмент, покрытие, наноструктурирование, износостойкость.

Введение

В Магнитогорском горно-металлургическом институте упрочнением с одновременным нанесением покрытий проволоочными щетками до середины 80-х годов прошлого века никто не занимался, как, кстати, и в мире. Впоследствии нам удалось найти два «древних», забытых авторских свидетельства [1, 2] и один патент о нанесении алюминиевого покрытия на стекло [3]. Никаких других публикаций по этой тематике в научно-технической литературе обнаружить не удалось. Идея и последующая разработка такой технологии появились, как нередко бывает, при выполнении совсем другой работы. В 1984 году проводилась научно-исследовательская работа по улучшению служебных свойств биметаллической стальной проволоки (Белевский Л.С. – руководитель, Кадошников В.И., Миронов Ю.В. и др.). Основная проблема заключалась в почти полном отсутствии сцепления между стальным сердечником и алюминиевой оболочкой. Были опробованы различные варианты обработки поверхности стального сердечника перед опрессованием алюминием, в том числе и зачистка вращающимися проволоочными щетками (ВПЩ), но сцепление не улучшалось. Появилась идея нанести щеткой перед опрессованием на стальной сердечник подслои алюминия. Испытания показали, что сцепление значительно улучшилось. Кроме того, было установлено, что такая обработка упрочняет поверхность стальной основы и повышает усталостную прочность. Мы довольно быстро поняли, что такая технология далеко выходит за рамки решения частной задачи и может найти широкое применение в машиностроении и металлургии. Впоследствии была создана лаборатория триботехники (рук. Белевский Л.С.), в которой способ упрочнения с одновременным нанесением покрытий получил дальнейшее теоретическое и экспериментальное развитие в работах Анцупова В.П., Кадошникова В.И., Досманова В.А., Волгина Л.В., Ошеверова И.И., Завалищиной Е.Г., Демы Р.Р. и др.

В этом году исполняется 35 лет с «рождения» и начала работ над этой важной научно-технической проблемой, над которой продолжают работать и многие другие, кроме перечисленных, работники университета. Результаты работ опубликованы в различных изданиях и докладывались на международных конференциях, симпозиумах и конгрессах в России, Франции, США, Японии, Южной Корее и Испании.

Необходимо отметить участие в исследовании и развитии рассматриваемой технологии нанесения покрытий ученых объединенного института машиностроения НАН Беларуси и Белорусского государственного университета (руководитель Леванцевич М.А.), а также ученых Тольяттинского государственного университета (Драчев О.Н., Зотов А.В.).

Следует заметить, что название способа упрочнения поверхности с одновременным нанесением покрытий и его аббревиатура неоднократно менялись: поверхностное пластическое деформирование с одновременным нанесением покрытий (ППДсП); деформационное плакирование гибким инструментом (ДПГИ); плакирование гибким инструментом (ПГИ). Во избежание путаницы в данной работе мы будем употреблять следующие термины: фрикционное плакирование (ФП); ударно-фрикционное плакирование (УФП); электрофрикционное плакирование (ЭФП).

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что приоритет в этой области принадлежит ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Авторами первых публикаций [4], авторского свидетельства [5] и кандидатской диссертации [6] являются работники нашего университета. По этой тематике защищено более десяти диссертаций, в том числе три докторских, опубликованы монографии [7-9].

Несмотря на большое количество работ, выполненных за более чем тридцатилетний срок, процесс фрикционного плакирования изучен и, особенно, внедрен в различных областях техники явно недостаточно, что сдерживает его более широкое и

эффективное использование в России и других странах.

В настоящей работе сделана попытка очень краткого анализа основных научных и практических результатов при исследовании различных видов фрикционного плакирования. Надеемся, что нас простят авторы работ, которые не упомянуты в библиографическом списке. Сделать обзор очень большого количества работ в одной небольшой статье невозможно.

Основная часть

Влияние поверхностных слоев на свойства материалов начали изучать еще в XIX веке. Такие поверхностные явления, как трение, смазка и адгезия играют важную роль во многих технологических процессах. Существуют сотни методов модификации поверхности, связанных с ее упрочнением, нанесением покрытий, износостойкостью, усталостной прочностью, коррозией и другими свойствами. Одним из эффективных способов упрочнения является поверхностное пластическое деформирование (ППД). В последние десятилетия получили развитие комбинированные процессы обработки, когда наряду с механическим воздействием добавляется действие электрического тока, лазера, плазмы и т.п. Одним из комбинированных методов является фрикционное нанесение металлических покрытий [10]. Покрытие наносится при прижатии прутка из медьсодержащих сплавов к вращающейся обрабатываемой детали. Процесс требует подготовки поверхности, малопроизводителен, толщина покрытия 1-2 мкм. В результате усилия прижима стержня происходит упрочнение поверхностного слоя детали, что приводит к повышению сопротивления усталости [11]. Значительно эффективнее использовать для упрочнения с одновременным нанесением покрытий гибкий инструмент – вращающиеся проволочные щетки [7-8], которые давно применяются для очистно-упрочняющей обработки в различных областях техники [12]. При фрикционном плакировании (ФП) стержень из материала покрытия (МП) с определенным усилием прижимается к ворсу ВПЩ. В зоне контакта МП разогревается почти до температуры

плавления, налипает на концы ворсинок и переносится на обрабатываемую поверхность изделия. Величина перемещения ВПЩ на поверхность изделия называется натягом (N). За счет совместной пластической деформации частичек МП и поверхностного слоя изделия покрытие имеет прочное сцепление с основой.

Материалы, оборудование, методика (при проведении исследований в МГТУ им. Г.И. Носова)

Исследуемыми образцами служили пластины 3x20x100 мм из стали марки 08. Покрытия на них наносили на плоскошлифовальном станке, на который вместо абразивного круга устанавливалась ВПЩ и приспособление для подачи материала покрытия. Цилиндрические образцы (сталь марки 20 и 50) диаметром 20 мм обрабатывали на токарном станке, на суппорт которого устанавливалась специальная приставка [7] или простейшее приспособление с ручной углошлифовальной машиной (УШМ). Диаметр ВПЩ 220-290 мм, скорость вращения 3000-6000 об/мин, диаметр стальной проволоки ворса – 0,25-0,50 мм, длина 30-40 мм. Материал для нанесения покрытия изготавливали в виде цилиндра диаметром 15-30 мм, который прижимался к ВПЩ с усилием 20-40 Н. Натяг – подача ВПЩ на обрабатываемое изделие 1-4 мм, число проходов ВПЩ по обрабатываемой поверхности (n) 2-9. В качестве материала покрытия были использованы медь и латунь Л-63. Для металлографических исследований использовали оптические микроскопы «Эпиквант» (Carl Zeiss, Германия), «Ерityp-2» (Carl Zeiss, Jena, Германия), IM7000 (Meiji Techno, Япония) и растровый электронный микроскоп РЭМ JSM-6490 LV (Jeol, Япония). Микротвердость определяли на приборах ПМТ-3 (ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург) и Buehler Micromet (Buehler, Бельгия). *Металлографические исследования выполнены в ЦПК НИИ Наносталей ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» к.т.н. Ефимовой Ю.Ю. Механические испытания проводили на разрывной машине Shimadzu (Япония). Исследование микротопографии поверхности*

проводились в лаборатории Научно-исследовательского центра «Микротопография» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на оптическом профилометре Contour GT K1 (Bruker, Германия) Губаревым Е.В.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Фрикционное и ударно-фрикционное плакирование. Для изучения механизмов деформирования поверхностного слоя основы и формирования покрытий при нанесении их гибким инструментом проведены модельные эксперименты на моно- и поликристаллических материалах. Было установлено, что толщина и структура деформированного слоя в сильной степени зависят от параметров инструмента и режимов обработки. В качестве примера рассмотрим результаты обработки металлических поверхностей двумя типами ВПЩ – сплошной из гофрированной стальной проволоки диаметром 0,25 мм и секционной из стальной закаленной проволоки диаметром 0,5 мм, сплетенной в пучки. Сплошная ВПЩ при окружной скорости 30-35 м/с оказывает, в основном, фрикци-

онное воздействие на поверхность металла. При постоянных параметрах рабочего инструмента толщина и структура деформированного слоя основы и покрытия существенно зависят от числа проходов инструмента по образцу, величины натяга, скорости обработки, материала основы и других факторов.

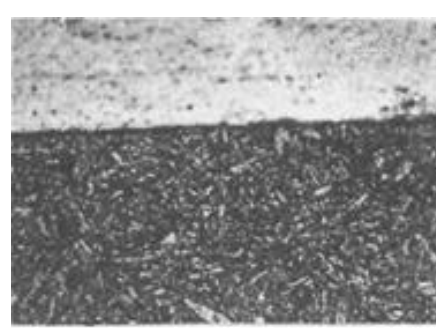
На рисунке 1 показана микроструктура поверхностных слоев сталей марок 08Ю, 20 и 55С2 после обработки сплошной ВПЩ с одновременным нанесением алюминиевого покрытия. Наибольшие изменения в структуре и максимальная толщина пластически деформированного поверхностного слоя имеют место в наиболее мягкой стали 08Ю (рисунок 1, а). Минимальная толщина деформированного слоя и изменения структуры при аналогичных параметрах обработки выявлена при металлографическом анализе стали 55С2 (рисунок 1, в). В таблице приведены значения микротвердости поверхности различных материалов после обработки сплошной ВПЩ.



а – сталь 08Ю



б – сталь 20



в – сталь 55С2

Рисунок 1. Микроструктура поверхностных слоев различных марок стали, после обработки (N = 1 мм, n = 10): а – 08Ю, б – 20, в – 55С2, х 800

Таблица 1

Микротвердость (МПа), поверхности различных материалов после обработки ВПЩ (N = 1 мм, n = 5)

Материал	Сталь			Mo	W
	08кп	45	ШХ15 (закал.)		
до обработки	1160	2360	6100	2150	4430
после обработки	1750	3260	6120	2950	5500

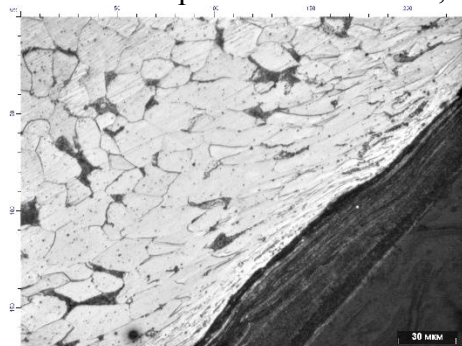
Известно, что при применении секционных дисковых щеток поверхность упрочняется наиболее эффективно [12]. Нами для упрочнения и наноструктурирования поверхностного слоя использовались секционные щетки, изготовленные из стальной закаленной проволоки, сплетенной в пучки. При входе в контакт такого пучка с поверхностью изделия он оказывает не только фрикционное воздействие, но и ударное, подобно струе дробы из дробеметной установки или чеканке. Обычно скорость пучка дробы составляет 60-70 м/с. Такие скорости реализованы и в нашем эксперименте. Будем называть этот процесс ударно-фрикционным плакированием.

При исследовании возможности наноструктурирования стальной поверхности гибким инструментом обработка образцов проводилась в два этапа. Вначале поверхность образцов упрочняли секционной ВПЩ, а затем ее заменяли на сплошную, которой наносили покрытие.

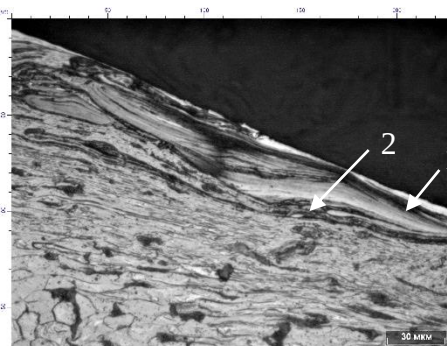
Исследование микроструктуры методами оптической микроскопии показало,

что во всех случаях на поверхности образуется деформированный слой (рисунок 2). В образце стали с феррито-перлитной структурой, подвергнутого обработке секционной ВПЩ, на поверхности обнаружен слой, имеющий повышенную травимость, толщиной порядка 50 мкм (рисунок 2, а). В образце, подвергнутого комбинированной обработке (деформационной + нанесение покрытия), на поверхности были выявлены два слоя: первый слой – латунное покрытие толщиной до 10 мкм (позиция 1 рис. 2, б) и второй слой – слой сильнодеформированной структуры толщиной порядка 30 мкм (позиция 2 рис. 2, б).

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) показал, что в обоих случаях в микроструктуре поверхностного слоя происходит формирование деформационных полос, состоящих из вытянутых зерен феррита, которые ориентированы перпендикулярно оси образца (рисунок 3, а). Кроме того, происходит вытягивание перлитных участков и деформация и дробление в них цементитных пластин (рисунок 3, б).

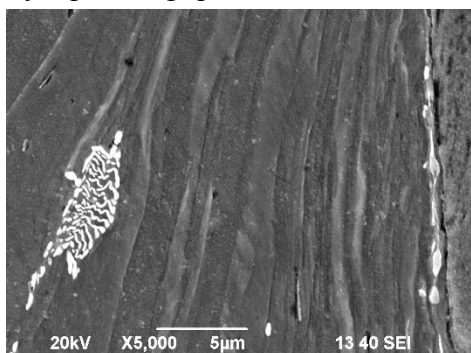


а

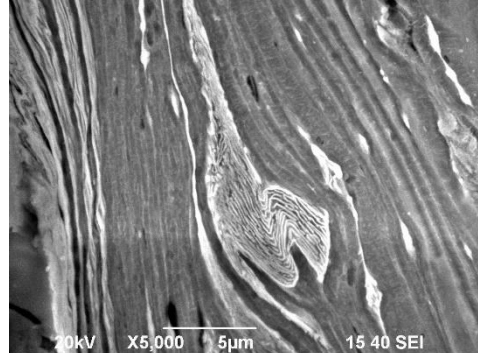


б

Рисунок 2. Микроструктура поверхностного слоя прутка стали марки 20: а – ударно-деформационная; б – комбинированная обработка щетками, х 500



а



б

Рисунок 3. Микроструктура поверхностного слоя прутка стали 20: а – ударно-деформационная обработка; б – комбинированная обработка

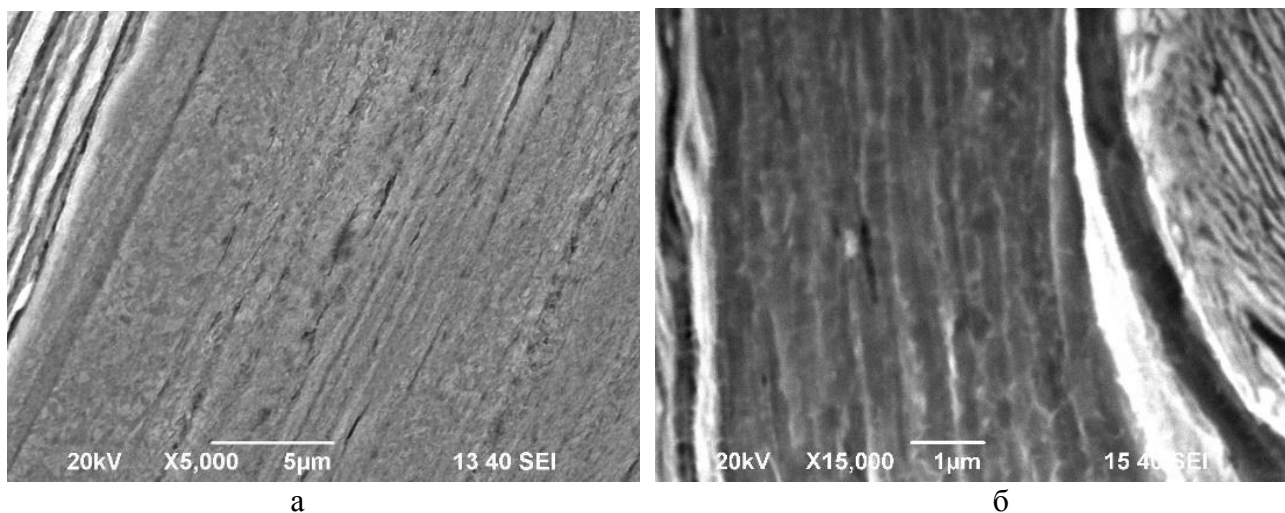


Рисунок 4. Микроструктура поверхностного (а) и приповерхностного (б) слоя прутка стали 20, подвергнутого ударно-деформационной обработке секционной ВПЩ

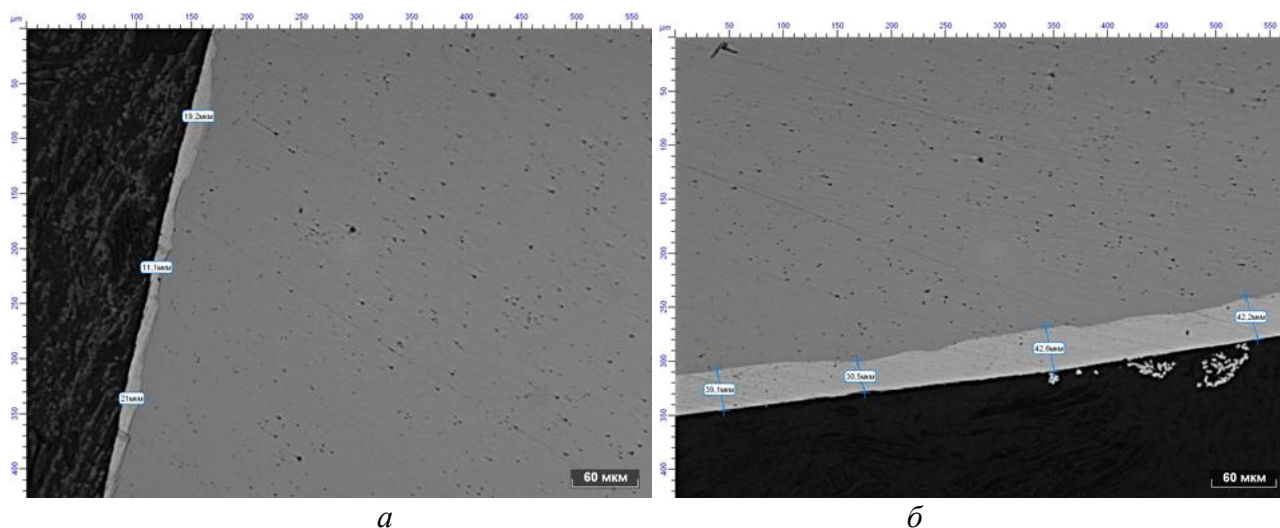


Рисунок 5. Толщина покрытия: а – ФП, б – ЭФП

Слой с повышенной травимостью в образце, подвергнутом ударно-деформационной обработке секционной ВПЩ, методами оптической микроскопии невозможно разрешить (рисунок 2, а). Методом РЭМ лишь в отдельных участках различаются волокна толщиной порядка 0,15 мкм, что свидетельствует о большой деформации (рисунок 4). Такой слой можно условно отнести к аморфизированному слою [13].

В основном материале в приповерхностном слое помимо образования в микроструктуре деформационных полос развиваются процессы фрагментации в них с образованием фрагментов размером до 0,13 мкм (рисунок 4, б). Аналогичный размер фрагментов возможно получить различными методами интенсивной пластической де-

формацией (ИПД), в частности равноканальным угловым прессованием (РКУП) на таком же классе сталей [14, 15].

Исследование электрофрикционного способа плакирования. Способ нанесения металлических покрытий с помощью ВПЩ с использованием электрического тока, предложен А.А. Абиндером в 1940 г. [1]. Какие-либо исследования этого процесса в технической литературе отсутствуют.

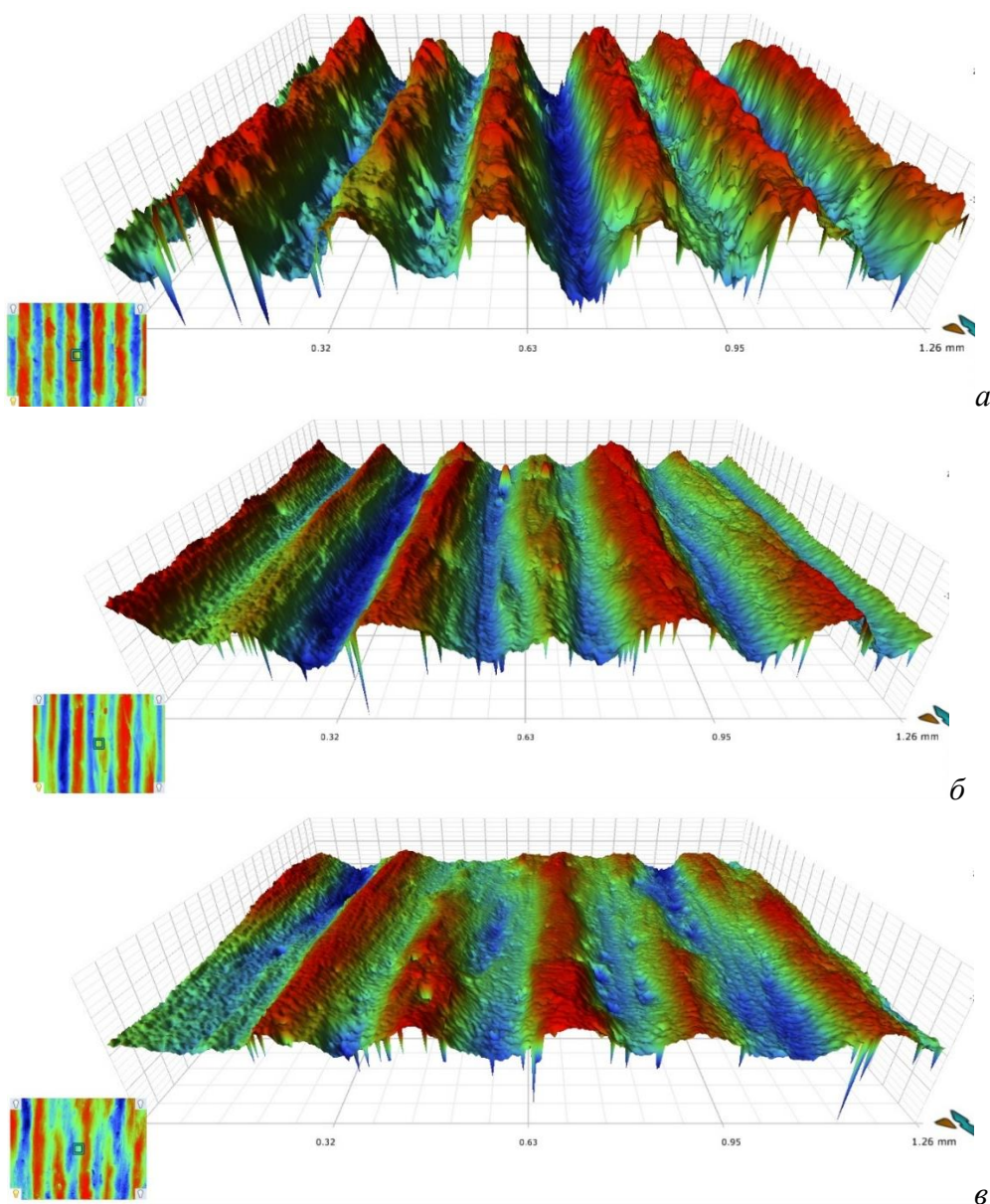


Рисунок 5. Микротопография поверхности образцов. Обработка поверхности:
 а – точение ($Wz \approx 25$ мкм, $Wsm \approx 90$ мкм), б – фрикционное плакирование ($Wz \approx 15$ мкм, $Wsm \approx 110$ мкм), в – электрофрикционное плакирование ($Wz \approx 8$ мкм, $Wsm \approx 110$ мкм); (Wz и Wsm – усредненные амплитудная и шаговая характеристики профиля волнистости)

Для проведения модельных опытов нами была изготовлена установка, которая позволяла менять напряжение от 10 до 40 В и силу тока от 20 до 120 А. Проведена серия экспериментов по нанесению покрытий на цилиндрические образцы диаметром 18 мм (сталь 20). Нанесение покрытий проводилось на токарном станке, на суппорте которого была закреплена угловая шлифовальная машинка с ВПЩ. Диаметр ВПЩ 100 мм, длина ворса – 25 мм, диаметр проволоки ворса – 0,25 мм. Скорость вращения щетки – 11 000 об/мин. Натяг – 1 мм. Ниже

приведены результаты исследований двух образцов, один из которых обрабатывался без подвода электрического тока, а другой при тех же режимах обработки – с подводом импульсного электрического тока, с напряжением 40 В и силой тока 50 А. Положительный полюс подводился к металлу покрытия (МП), а отрицательный – к обрабатываемому образцу. Таким образом, происходил дополнительный разогрев в зоне контакта МП-ВПЩ и в зоне контакта ВПЩ-поверхность образца. В качестве материала покрытия использовалась латунь

Л63. Результаты металлографического и электронно-микроскопического исследования представлены на рисунке 5. На рисунке 6, а показана микротопография поверхности, обработанной точением. При ЭФП (рисунок 6, в). поверхностные слои изделия выглядят более «сглаженными», чем при ФП (рисунок 6, б). Очевидно, что дополнительный разогрев при подводе электрического слоя делает поверхностный слой более пластичным.

Бороздки, которые оставляет ворсинки щетки, успевают деформироваться, об этом свидетельствуют также и замеры микротвердости. Микротвердость покрытия при ЭФП и нагрузке 10 гс составляет в среднем 2432 МПа, а при ФП и той же нагрузке 4290 МПа. Деформация основы при ЭФП и ФП происходит примерно одинаково. Толщина покрытия при ЭФП примерно в 2 раза больше, чем при ФП (рисунок 5).

В работе [16] исследована структура хромовых покрытий, сформированных ЭФП на специальной установке, в которой использовали металлическую щетку с никромовыми пластинами-вставками. Положительные полюс подвели к ролику из металла покрытия, а отрицательный – к вставным никромовым пластинам. Толщина слоя хромовых покрытий составляла 12...15 мкм. Толщина двухслойных покрытий хром-фторопласт Ф-4 и хром-баббит Б83 составляла 18...20 мкм. Проведены металлографические и трибологические исследования покрытий. Установлено, что верхний слой хромового покрытия состоит из мелких и крупных частиц подплавленного хрома. Триботехнические испытания показали, что дополнительные покрытия из фторопласта или баббита не дает каких-либо существенных преимуществ, в том числе и по сравнению с образцами с гальваническими хромовыми покрытиями. Параметр шероховатости Ra у покрытий нанесенных ЭФП на 30 % выше, чем у гальванических хромовых покрытий.

В работах [17, 18] произведена оценка влияния функциональных покрытий на снижение генерируемого зубчатым зацеплением шума. Установлено, что эффектив-

ность применения технологии ФП для снижения шума конических зубчатых передач во многом зависит от рационального выбора состава материала покрытия. Покрытия на рабочем профиле зубьев колес в ряде случаев значительно меняют общий характер распределения звуковой энергии по частотам, снижая уровень шума на одних частотах и оставляя его неизменным или даже повышая на других. При этом лучшие результаты по снижению уровня шума зубчатых передач во всем спектре частот обеспечило покрытие из бронзографита Бр05С20Гр0. В итоге, снижение шума передачи по общему уровню составило от 2 до 4 дБ, а по отдельным спектральным составляющим от 6 до 9 дБ.

Нанесение антифрикционных покрытий на детали машин для повышения износостойкости. Области применения обработки деталей методом ФП. В качестве примера рассмотрим обработку группы деталей металлургического оборудования [7, 8].

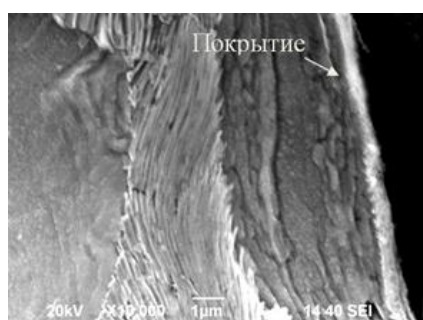
Штоки гидроцилиндров длиной 3190-5165 мм и диаметром 60-90 мм механизма перемещения стола наждачно-зачистных станков прокатного цеха. Штоки изготавливаются из стали марки 45 с последующей закалкой ТВЧ до твердости 50-55 HRC. Шток работает в паре с бронзовыми втулками и резиновыми уплотнителями в режиме граничного трения в условиях сильной запыленности. Во время работы окалина вместе с абразивной пылью налипает на маслянистый шток, вызывая его интенсивный износ. Испытания показали увеличение стойкости в 1,4-3,0 раза, за счет нанесения методом ФП медного покрытия.

Плунжеры механизма гидравлического уравнивания рабочих валков клетей чистой и черновой группы стана 2500 горячей прокатки. Плунжеры изготавливаются из стали марки 45 или 20ХГСНМ, термообработка – нормализация или закалка. Все обработанные плунжеры с нанесенным медным покрытием были установлены в подушки рабочих валков. Наблюдения показали, что, несмотря на истирание покрытия в процессе работы, интенсивного износа плунжеров не наблюдается, на рабо-

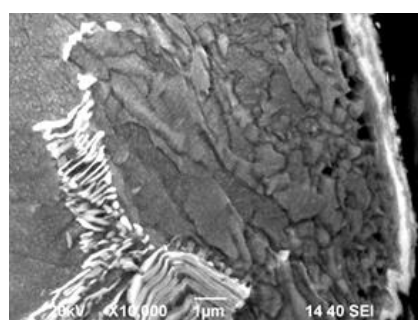
чей поверхности нет задиров, рисок, царапин. Результаты испытаний показали увеличение стойкости в 1,4-1,7 раза.

Зубчатые венцы волновых передач и роторы электрических машин [7, 19, 20]. Покрытия наносились на зубчатые венцы цилиндрических колес и волновых передач электрических машин малой мощности (ЭМММ) на специально разработанной установке. Модуль зацепления 0,15-0,5 мм. Диаметры торцевых колес 40-200 мм. Диаметры цилиндрических колес 25-100 мм. Материал колес – сталь марок 14X14H2, X16H6, 20X13. Условия эксплуатации: Рабочие температуры от -60 до +200°C.

На рисунке 7 показана микроструктура поверхности зуба цилиндрического колеса. Толщина медьсодержащего покрытия около 1 мкм (рисунок 7, а). Под покрытием наблюдается деформированный слой, в котором происходит фрагментация феррита на более мелкие зерна и разрушение цементных пластин (рисунок 7, б).



а



б

Рисунок 7. Микроструктура поверхности зуба колеса

Заключение

Рассмотрен процесс упрочнения металлической поверхности с одновременным нанесением функциональных покрытий гибким инструментом – вращающимися проволочными щетками (фрикционное плакирование – ФП). Приоритет в теоретическом и экспериментальном исследовании этого процесса, а также разработка технологий для его практического применения принадлежит МГТУ им Г.И. Носова.

При обработке гибким инструментом всех исследуемых материалов наблюдается упрочнение поверхностного слоя

Зубья волновых передач торцевого исполнения изготавливаются трапециевидальной формы, поэтому в зацеплении имеет место трение скольжения, вызывающее сильный износ зубьев. При работе со смазкой (смазка 274) в условиях очень низких температур имеют место отказы ЭМММ, что недопустимо по условиям эксплуатации изделия. Испытано двадцать пар колес волновых передач. Испытания производились на стендах ВНИИМЭМ (г. Санкт-Петербург). Срок службы колес без смазки (сталь по стали) при температуре 93-110°C в коррозионной камере составил 15-30 ч. При покрытии гибкого колеса медьсодержащим покрытием срок службы составил 30ч. Покрытие торцевого колеса сталью марки 20X13 увеличило срок службы передачи до 160 ч. Наилучшие результаты получены при нанесении медьсодержащих покрытий на оба колеса, срок службы которых составил 200 ч.

Методом ФП возможно повышение износостойкости некоторых видов режущего инструмента [21].

толщиной 0,04-0,14 мм. Впервые установлено, что при обработке ВПЩ на поверхности образуется тонкий слой аморфизированного материала, причем наиболее четко это проявляется в материалах с высокой температурой плавления, особенно у вольфрама. Впервые установлено, что методом ударно-фрикционной обработки гибким инструментом возможно получение твердого, наноструктурированного поверхностного слоя, с размером фрагментов до 0,13 мкм подобно тому, как это достигается при ИПД. Ударно-фрикционная обработка секционными ВПЩ может быть использована для упрочнения деталей и инструмента.

Нанесение функциональных покрытий может дополнительно повысить износостойкость и другие служебные характеристики изделий.

Установлено, что использование электрического тока интенсифицирует процесс ФП, при этом существенно увеличивается толщина покрытия и его пластичность. Нанесение медьсодержащего покрытия на штоки и плунжеры гидравлики позволило увеличить срок службы в 1,4-3 раза, на зубья колес волновых передач торцевого исполнения в 6 раз.

Процесс ФП экологически чист, производителен, реализуется на токарных, шлифовальных и других металлорежущих станках с использованием простой оснастки или ручных углошлифовальных машин.

Библиографический список

1. А.с. 57162 (СССР). Способ нанесения металлических покрытий // А.А. Абиндер // Б.И. 1940. №6. С 1-3.
2. А.с. 139892 (СССР). Автомат для серебрения циферблатов часов методом натирания / И.М. Смирнов, Н.А. Николаев, С.Д. Крылов // Б.И. 1961. №14. С. 59.
3. Пат. 863087 (Великобритания). Улучшение метода нанесения металлического покрытия на поверхность / А.Д. Джеймс // Реферативный журнал. Металлургия. 1961. №3. С. 128.
4. Белевский Л.С. Поверхностное пластическое деформирование с одновременным нанесением покрытий // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1987. - №7. - С. 104-105.
5. А.с. 1206068 СССР, В 24 В 39 / 00. Способ нанесения покрытий / Л.С. Белевский, В.И. Кадошников, Ю.В. Миронов. Опубл. 23.01.86. Бюл. №3. 3 с.
6. Кадошников В.И. Совершенствование технологии производства биметаллической сталеалюминиевой проволоки применением нового способа нанесения промежуточного слоя. Дис. канд. техн. наук. Магнитогорск, 1988. 192 с.
7. Белевский Л.С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом. – Магнитогорск: Лицей РАН, 1996. 231 с.
8. Анцупов В.П. Теория и практика плакирования гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. 241 с.
9. Завалищин А.Н., Смирнов О.М., Тулунов С.А. Модификация поверхности металлических изделий с использованием покрытий. М.: Орбита-М, 2012. 335 с.
10. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
11. Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания: пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
12. Перепичка Е.В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками. М.: Машиностроение, 1989.
13. Белевский Л.С., Белевская И.В., Ефимова Ю.Ю. Фрикционная наноструктурирующая обработка металлических поверхностей и нанесение функциональных покрытий гибким инструментом // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. № 1. С. 70-76.
14. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet PRO software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Т. 54. № 7-8. С. 387-392.
15. Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Барышников М.П., Никитенко О.А. Формирование структуры и механических свойств углеродистой конструкционной стали в процессе наноструктурирования методом равноканального углового прессования // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 7. С. 11-17.
16. Белевский Л.С., Леванцевич М.А., Юреть Е.Л., Пилипчук Е.В., Дема Р.Р. Повышение эксплуатационных характеристик деталей и оборудования методом электрофрикционного плакирования гибким инструментом // Производство проката. 2018. № 10. С. 32-38.

17. Басинюк В.Л., Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Мардосевич Е.И. Улучшение триботехнических свойств и снижение шума зубчатых передач плакированием функциональных покрытий на рабочий профиль сопрягаемых зубьев // Трение и износ. 2013. Т. 34. № 6. С. 575-582.
18. Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н. Улучшение эксплуатационных характеристик деталей поверхностным модифицированием методом плакирования гибким инструментом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 10 (130). С. 16-20.
19. Belevskiy L., Popov V., Tulupov S., Smirnov O. Enhancement of reliability of machines and materials by friction plating // Advanced Materials Research. 2009. Т. 59. С. 46-50.
20. Белевская И.В., Белевский Л.С., Губарев Е.В., Ефимова Ю.Ю. Исследование структуры, кристаллографической текстуры, микротопографии поверхности функциональных покрытий, нанесенных гибким инструментом, и некоторые области их применения. Часть 2. Исследование влияния функциональных покрытий, нанесенных гибким инструментом, на некоторые свойства материалов и области их применения // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 1. С. 36-43.
21. Анцупов В.П., Завалищин А.Н., Кадошников В.И., Дема Р.Р. Повышение стойкости режущего инструмента нанесением композиционных антифрикционных покрытий // Технология машиностроения. 2003. № 4. С. 25-26.

Information about the paper in English

L.S. Belevskiy, R.R. Dema

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

M.A. Levantsevich

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: levancev@mail.ru

E.V. Pilipchuk, E.L. Yurut

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus
Received 05.06.2019

SURFACE HARDENING AND FUNCTIONAL COATINGS INSTALLED BY ROTATING WIRE BRUSHES

Abstract

This paper examines the process of steel surface hardening combined with the deposition of functional coatings using flexible tools – i.e. rotating wire brushes. The first study that looked at this process, which was later named Friction Cladding, was undertaken in the middle of the 1980s at the Nosov Magnitogorsk Mining and Metallurgy Institute. Friction cladding can be implemented on lathes, grinders and other metal-cutting machines with simple tools or angle grinders. 3x20x100 mm plates of steel 08 were used as specimens in a metallographic study of surface layers. The coatings were installed on a flat surface grinder equipped with a rotating wire brush (instead of an abrasive disc) and a coating material feeder. Ø20mm cylindrical specimens of steel 50 were machined on a lathe with an angle grinder fixed to the lathe carriage. Optical microscopes and the scanning electron microscope JSM-6490 LV were used for metallographic study. Electron microscopical study was conducted with the help of the electron microscope TESLA BC-613 using a replica technique. Roughness measurements and analysis were conducted per GOST R ISO 25178 on the Contour GT K1 (Bruker) unit. The average coating thickness is 20-25 µm, the particle size varies from 0.3 to 0.6 µm. The study looked at the microstructure and properties of the functional coatings produced after the surface had gone through impact friction cladding with a flexible tool. It was established that such processing created a hard nanostructured surface layer with the fragment size reaching 0.13 µm, similar to the effect produced by severe plastic deformation. It was found that the use of electric current intensified the process and resulted in a much thicker and ductile coating. Application of copper-containing coatings to hydraulic rods and rams resulted in a 1.4-3 times longer life and extended the life of wave gear teeth by 6 times.

Keywords: friction cladding, impact friction cladding, friction electrocladding, flexible tools, coating, nanostructuring, wear resistance.



УДК 539.422.53

**А.В. Заболотский, М.Ю. Турчин,
А.О. Мигашкин, В.Т. Хадыев**
ООО Группа "Магнезит"
г. Сатка, Россия.
E-mail: azabolotskiy@magnezit.com
Дата поступления 27.05.2019

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЕФЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТОГО ОГНЕУПОРА СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

Проведен расчет коэффициентов интенсивности напряжений для объемной системы дефектов с применением численных методов. Работа выполнена с целью получения значений вязкости разрушения дефектного массивного тела и дальнейшего использования результатов при моделировании роста усталостных трещин в конструкционных материалах, в частности, в огнеупорах сталеплавильного производства. В результате работы установлены практически значимые свойства зависимости вязкости разрушения (коэффициента интенсивности напряжений) от взаимного расположения дефектов материала и выявлена невозможность применения справочных значений этого параметра, определенных ранее для плоских периодических групп дефектов (микротрещин или пор).

Ключевые слова: моделирование, интенсивность напряжений, усталостные трещины, огнеупоры.

Введение

Конструкционные материалы часто представляют собой гетерогенные системы, состоящие из нескольких фаз, в том числе находящихся в различном агрегатном состоянии. Например, широко распространенные керамические материалы, представляют собой системы нескольких твердых (как правило неорганических) фаз, между которыми распределены пустоты разнообразной геометрической формы и размера, заполненные воздухом (микротрещины и поры).

В частности, такие материалы применяются в качестве футеровки тепловых агрегатов, вследствие способности сохранять служебные характеристики вплоть до высоких температур. Одним из важных практических применений керамических материалов является металлургия, при этом керамические футеровки металлургических агрегатов принято называть огнеупорными. Следует отметить, что металлургические процессы вследствие своей цикличности

сопровождаются резкой сменой температуры рабочего слоя футеровки, называемой "термическим ударом" или "термоударом".

Стойкость огнеупорных материалов в условиях термоудара различна и может составлять от 1 до 100 с небольшим циклов или "теплосмен" до разрушения. В первом случае, как правило, имеет место катастрофическое прохождение сквозной трещины сквозь хрупкое тело, а в последнем - разрушение, вследствие малоциклового усталости. Более того, разрушение конструкции при первой же теплосмене, как правило, свидетельствует о неправильном выборе материала, либо о грубом нарушении правил эксплуатации оборудования, напротив, малоцикловое усталостное разрушение футеровок наряду с абразивным и химическим износом считается допустимым.

Численное моделирование усталостного разрушения огнеупора удобно представить, как постепенное продвижение трещины между соседними дефектами (порами) материала при достижении механическими, в том числе термомеханическими напряжениями некоторого порогового значения. При этом, вследствие образования

новых поверхностей при росте трещины, а также тепловых и акустических эффектов происходит разгрузка напряженного состояния материала. При последующем возрастании напряжений под действием внешних нагрузок цикл "рост напряжений - разгрузка" повторяется [1].

Движение трещины может начаться в двух случаях: при достижении напряжением в массивном (бездефектном) материале предела прочности или при достижении напряжением в окрестности микротрещины уровня, достаточного для образования новой поверхности [2]. В последнем случае для расчета необходимо использовать такой параметр материала как критический коэффициент интенсивности напряжений, определяемый экспериментально путем разрушающего испытания. Фактическое текущее значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) определяется расчетным путем и зависит от формы и размеров дефектов материала и их расположения относительно действующей нагрузки. Подробно методика вычисления этого параметра изложена в [3]. В этой работе приведены таблицы для расчета КИН для дефектов разнообразной формы, данные для которых получены как аналитическим, так и численным решением. К сожалению, случаев близких к типичной пространственной поровой структуре керамических материалов в [3] не рассмотрено, в связи с чем для моделирования разрушения керамического материала был проведен численный расчет КИН для интересующего случая взаимного пространственного расположения мелких дефектов нагруженного материала (пор). Рассмотрено влияние механических свойств материала, формы и размера дефектов, а также расстояния между ними.

Ранее было опубликовано значительное количество работ, посвященных моделированию возникновения и роста усталостных трещин в том числе и в хрупких материалах. Эти работы рассматривают процесс разрушения тел как с специально заложенным дефектом [4, 5], так и тел, дефекты в которых обусловлены структурой самого материала тела [6,7]. Рассматриваются стадии разрушения материала [8, 9] и структуры возникающие при разрушении,

характеризующие описанную стадийность процесса [10 - 12]. Автор [13] рассматривает напряженное состояние материала, в котором существует периодическая система дефектов (микротрещин), то есть задача того же класса, что рассмотрена в настоящей работе.

Модель и метод расчета

Для вычисления КИН использовали модель поровой структуры, в которой поры находились в узлах кубической решетки. Форма пор была от сферической до вытянутой до соотношения осей 8 к 1, в случае вытянутой формы длинные стороны были параллельны друг другу. Четверть полученной расчетной ячейки (вытянутые поры) приведена на рис. 1. Согласно результатов исследований с применением электронного микроскопа выбранная модель близка по своему строению к фактически наблюдаемым структурам распространенных периклазоуглеродистых огнеупоров.

Расчеты проводили при помощи ПО ANSYS Mechanical R15. Напряжение создавалось путем прикладывания растягивающей нагрузки (силы) как параллельно, так и перпендикулярно большей из осей эллипсоидов, таким образом, чтобы напряжение в на достаточно большом удалении от пор составляло 1 МПа. Далее КИН вычисляли, используя выражение:

$$K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi r}, \quad (1)$$

где σ_y - фактическое напряжение, r - расстояние от точки роста трещины или дефекта (вершины) до соседней трещины. С другой стороны, согласно [3]:

$$K_I = F \sigma_n \sqrt{\pi a}, \quad (2)$$

где σ_n - напряжение в отдаленной окрестности трещины (в нашем случае 1 МПа), a - характерный размер трещины, F - функция, зависящая от формы, размера и взаимного расположения дефектов.

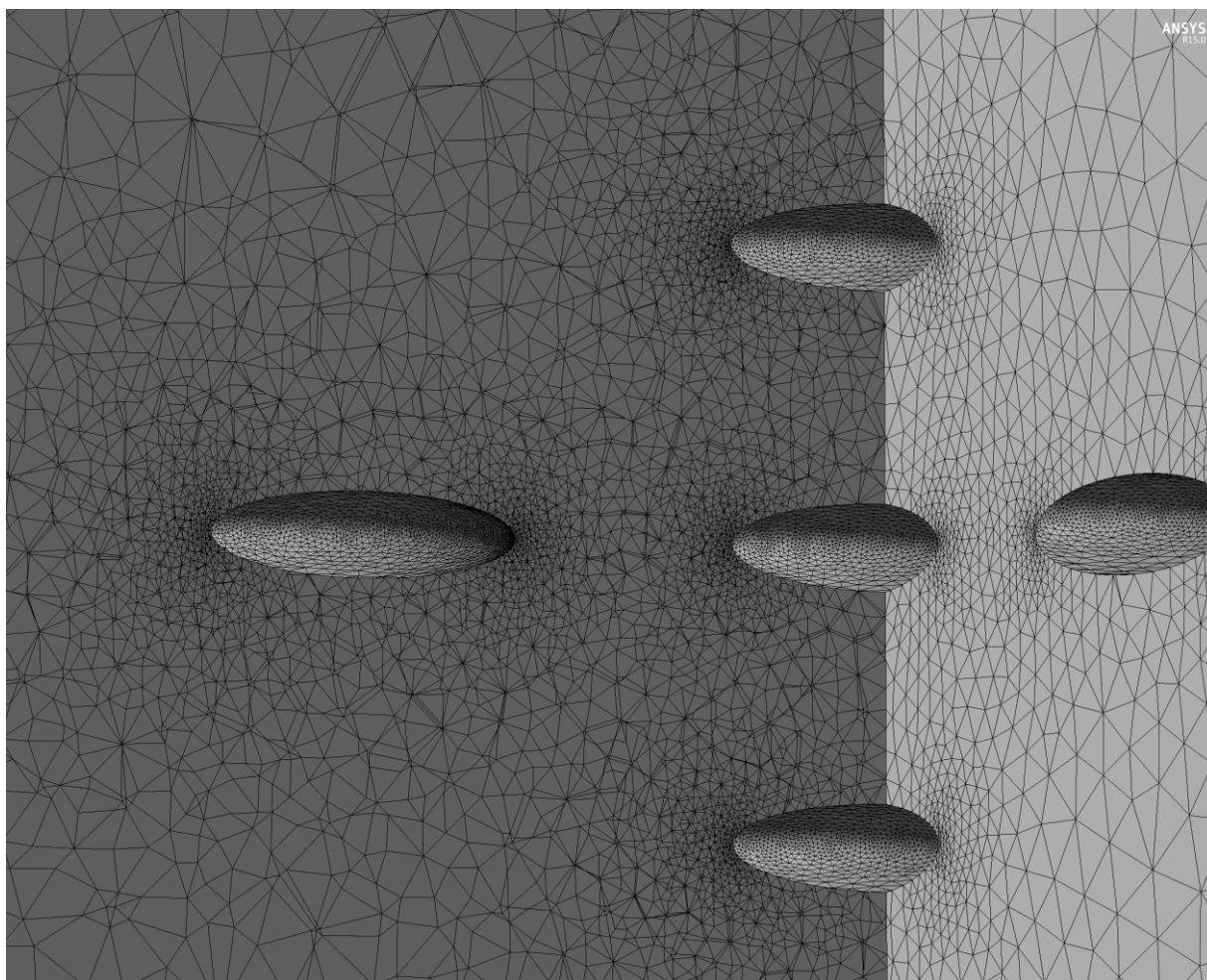


Рисунок 1. Пример ячейки для расчетов

Картина напряжений вокруг одиночной поры приведена на рис. 2, растягивающие усилия приложены вдоль оси X.

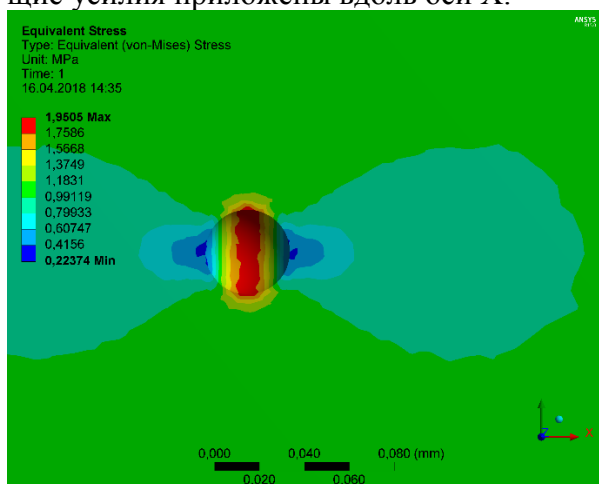


Рисунок 2. Эпюра напряжений вокруг одиночной поры при растяжении вдоль оси X

Соответственно, на оси поры, параллельной действующей силе, происходит "разгрузка" - напряжения в окрестности

поры существенно ниже, чем в окружающем материале. В перпендикулярной плоскости происходит концентрация напряжений и, в приведенных условиях (сферическая пора диаметром 40 мкм), фактические напряжения на поверхности оказываются вдвое выше, чем в объеме материала. Аналогичная картина имеет место и для системы пор, так, на рис. 3 приведена эпюра напряжений для системы эллиптических пор, где видно, что зоны разгрузки и концентрации напряжений, перекрываясь создают результирующую картину. Разность в величине максимальных напряжений объясняется в том числе зависимостью этой величины от кривизны поверхности концентратора напряжений (в приведенном случае для эллипсоидов кривизна поверхности больше).

В рамках численного эксперимента варьировали следующие параметры: диаметры эллипсоидов (сферические поры в

данном случае рассматривались как частный случай равных диаметров), расстояние между дефектами, взаимное расположение которых приведено на рисунке 1, направление растягивающего напряжения для эллипсоидов (параллельно большому или меньшему из его диаметров). Анализировали максимальные напряжения, возникающие в окрестности пор, то есть напряжения на поверхности поры, в плоскости, перпендикулярной растягивающей нагрузке. В качестве материала матрицы использовали материал из библиотеки материалов ANSYS R15.

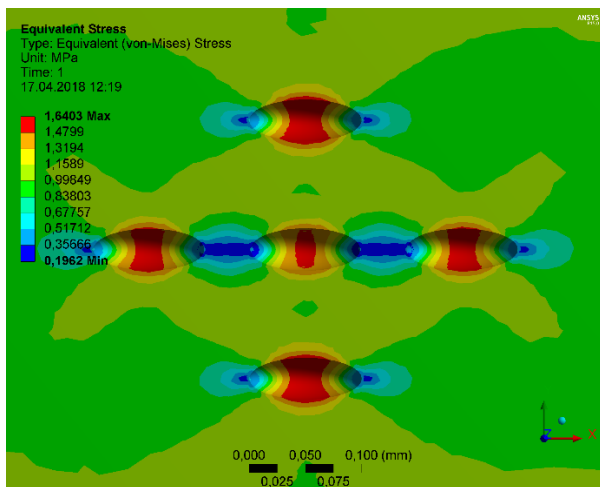


Рисунок 3. Картина напряжений вокруг системы эллиптических пор

Результаты и обсуждение

При нагружении системы сферических пор растягивающим напряжением были получены величины максимальных эффективных напряжений на поверхности дефектов в зависимости от диаметра пор и расстояния между ними, график которых приведен на рисунке 4 слева (в логарифмическом формате).

При расстоянии между порами, соизмеримом или превышающем их диаметры, их взаимное влияние на максимальные напряжения ослабевают (при этом отношение напряжения на поверхности дефекта к напряжению в его удаленной окрестности определяется только его формой и не зависит от размера). Если расстояние между порами соизмеримо или меньше (до 100 раз) его диаметра то максимальные напряжения возрастают с ростом диаметра поры, од-

нако, определяющим в данном случае является соотношение "диаметр поры - расстояние", поскольку при использовании этой величины все экспериментальные точки ложатся на одну линию в указанной области (рисунок 4). При дальнейшем сближении пор величина максимального напряжения перестает нарастать, однако экспериментальные результаты демонстрируют довольно широкий разброс, связанный, вероятно с ограничениями на применимость модели.

Полученные результаты были использованы для расчета функции F (выражение 2) и K_I . Результаты расчета приведены на рисунке 5.

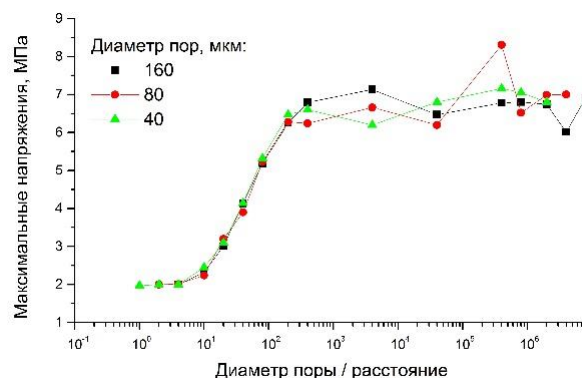


Рисунок 4. Максимальные напряжения на сферических порах в поле растягивающей нагрузки 1 МПа в зависимости от диаметра поры и расстояния между ними

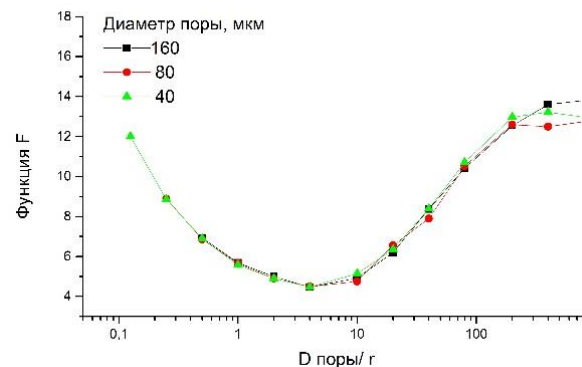


Рисунок 5. Зависимость функции F и K_I от размера сферических пор и расстояния между ними. K_I рассчитан для растягивающего напряжения 1 МПа

Из полученных результатов очевидно, что определяющим для F является отношение диаметра пор к расстоянию между ними. Практически во всем диапазоне соотношения экспериментальные данные ложатся на одну линию (рисунок 5). Зависимость проходит через минимум при соотношении диаметр поры к расстоянию между ними равном 6 ± 2 . При сближении и удалении пор друг от друга функция F возрастает до 3 раз относительно своего минимального значения. При расстоянии между порами меньшем $1/100$ диаметра функция F и выходит на постоянные значения.

При значительном удалении пор друг от друга функция F продолжает монотонно возрастать, однако, вероятно при расстояниях между порами, значительно превышающем их собственный размер, следует пользоваться методиками расчета K_I , приводимыми [3] для одиночных дефектов в плоских пластинах или бесконечных телах. В частности, Сахибгиреев в своей диссертации [15] приводит данные о том, что влияние включения на картину механических напряжений вокруг него полностью нивелируется на расстоянии равном 3 или более характерных размеров самого дефекта. Аналогичные данные приведены в [14]. Вероятно, что при росте расстояния между дефектами будет возрастать и K_{Ic} - критиче-

ский коэффициент интенсивности напряжений (вязкость разрушения) самого материала.

Мураками (Y. Murakami) [3] рассматривает двоякопериодическую систему трещин равной длины, расположенных в одной плоскости в поле перпендикулярной растягивающей нагрузки и приводит значение функции F . Это наиболее близкий случай к рассмотренному нами. Важно, что характер функции F , приведенный в справочнике совпадает с установленным нами путем численного моделирования.

Аналогичная картина наблюдается и при растяжении тела с эллиптическими порами, в случае если растягивающее напряжение действует параллельно большей оси дефекта. При этом уровень максимальных напряжений и, как следствие, функции F и K_I оказывается ориентировочно на 20 - 40 % выше, чем для сферических пор.

При растяжении тела с эллиптическими порами перпендикулярно большей оси расчетные значения напряжений многократно возрастают по сравнению с рассмотренными ранее вариантами (рис. 6, слева). Очевидно, что при увеличении кривизны поверхности дефекта (отношения осей) максимальные напряжения существенно возрастают, линейно при значительном расстоянии между дефектами и согласно степенной зависимости при их сближении.

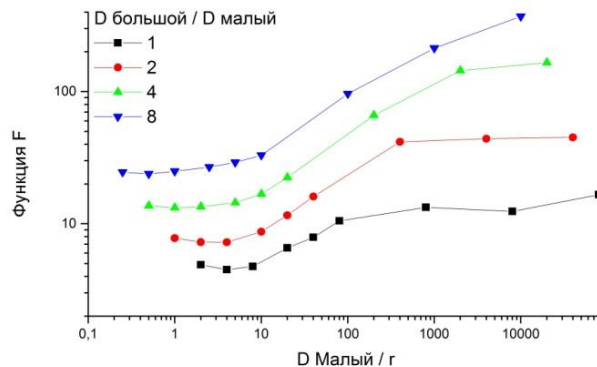
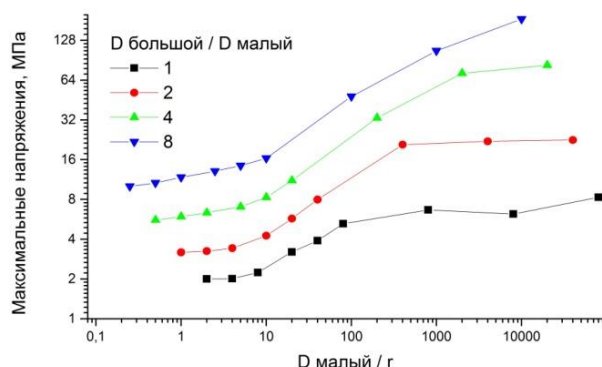


Рисунок 6. Максимальные напряжения и функция F при растяжении системы эллиптических пор перпендикулярно большей оси усилием 1 МПа.

Вид зависимости функции F от кривизны поры и относительного расстояния между ними аналогичен виду рассмотренной выше зависимости максимальных

напряжений (рис. 6, справа). Уровень значений функции F в случае растяжения перпендикулярно большей оси эллиптической поры превышает значения этой функции

для случая растяжения сферических пор или эллиптических параллельно большой оси приблизительно на один порядок.

На рис. 7 приведены графики зависимости K_I для случаев растяжения эллиптических пор усилием 1 МПа в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В случае удаленных друг от друга дефектов (расстояние более чем 1/10 малого диаметра) значения K_I для этих случаев отличаются друг от друга приблизительно на порядок. При сближении дефектов отличия в K_I возрастают и могут достигать уже двух порядков.

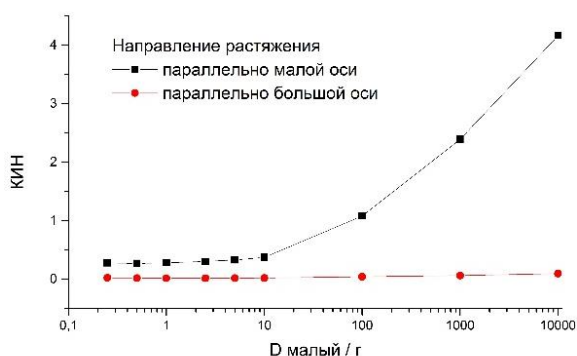


Рисунок 7. K_I при растяжении тела с системой эллиптических пор во взаимно перпендикулярных направлениях

Мураками [3] приводит для двоякопериодической системы дефектов на плоскости значения функции F для интервала от 0 до 0,8 по значению параметра $2a/d$ где $2a$ - больший диаметр поры, d - расстояние между центрами пор по направлению большего диаметра. В настоящей работе рассмотрен случай сравнительно близко расположенных дефектов, что соответствует соотношению $2a/d$ равному 0,6 и более. Полученные результаты превышают результаты Мураками в 2 раза для сферических пор и более чем в 5 раз для случая эллиптических дефектов с отношением осей равном 8. Таким образом, использование значений K_I , приведенных в справочнике для плоской модели недопустимо при моделировании роста трещин с множественными дефектами в объеме. Последняя задача требует моделирования структуры тела (взаимного расположения дефектов и их размеров) и расчета K_I для полученной структуры.

Выводы

Численными методами выполнен расчет коэффициентов интенсивности напряжений для объемной системы дефектов, моделирующей структуру пористого конструкционного материала, например, керамического. В результате построены зависимости K_I от расстояния между дефектами структуры и их собственными геометрическими характеристиками (размер, соотношение осей в случае эллиптических дефектов).

Установлено, что коэффициенты интенсивности разрушения для объемной модели значительно (до 5 раз и более) могут превышать значения вязкости разрушения для аналогичной плоской модели (среза или сечения решетки дефекта). Данный результат указывает на то, что при расчетах роста трещин в телах с объемной системой дефектов, необходимо проводить предварительное определение K_I для фактической схемы расположения дефектов.

Библиографический список

1. Zabolotsky A.V., Axelrod L.M. Application of the Cell Automata Method to the Brittle Material Thermal Fatigue Fracture Simulation. // Journal of Scientific and Engineering Research. 2017. v. 4, № 10. p. 284-292.
2. Г.П. Черепанов. Механика хрупкого разрушения. М.: «Наука», 1974.
3. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. В 2-х томах. Пер. с англ. / Под ред. Ю. Мураками. - М.: Мир, 1990. - 1016 с.
4. Шабанов А.П. О механизме роста усталостной трещины в поле внешних сжимающих напряжений. // Прикладная механика и техническая физика. 2005. т. 46, № 6, С. 108 - 115.
5. Гучинский Р.В., Петин С.В. Численное моделирование распространения полуэллиптической трещины усталости на основании оценки накопления повреждений. // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. т. 8, № 4, С. 376 - 385.

6. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Разрушение при сжатии. // Физическая мезомеханика. 2018. т. 21, № 3. С. 86 -102.
7. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Модель хрупкого разрушения пористых материалов при сжатии. // Математическое моделирование систем и процессов. 2009, № 17. С. 47 - 57.
8. Капустин С.А., Горохов В.А. Пантелеев В.Ю., Чурилов Ю.А. Численное моделирование процессов зарождения и развития трещин на основе механики поврежденной среды. // Проблемы прочности и пластичности 2009. вып. 71. С. 36 - 44.
9. Полкунов Ю.Г., Каракулина Е.О. Математическое моделирование развития неустойчивых трещин в зернистых материалах. // Вестник ОГУ. 2007, №5. С. 181 -184.
10. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Структуры в процессах разрушения. // Изв. РАН. МТТ. 1999, № 5. С. 49 - 71.
11. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Иерархия структур при разрушении. // Докл. РАН. 1992. т. 325, № 4. С. 735 - 739.
12. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Структуры разрушения в условиях интенсивного сжатия. // Проблемы механики деформированного твердого тела и горных пород. М.: Физматлит. 2006. С. 152 - 166.
13. Бурого Н.Г. Моделирование разрушения упругопластических тел. // Вычислительная механика сплошных сред. 2008. т. 4, № 4. С. 5 - 20.
14. Леган М.А. Хрупкое разрушение элементов конструкций с концентраторами напряжений. // Вести НГУ. Сер. матем., мех., информ. 2013. т. 13, № 3. С. 70 - 76.
15. Сахибгареев, Ринат Рашидович Управление процессами структурообразования модифицированных цементных бетонов. Дисс. на соискание ученой степени д.т.н., Уфа, 2010, 367 с.

Information about the paper in English

A.V. Zabolotskiy, M.Yu. Turchin, A.O. Migashkin, V.T. Khadyev
Magnezit Group
Satka, Russia
E-mail: azabolotskiy@magnezit.com
Received 27.05.2019

NUMERICAL MODELLING OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR SPATIAL DEFECTS: THE CASE STUDY OF PERICLASE-CARBONACEOUS REFRACTORY MATERIAL USED IN STEELMAKING

Abstract

The authors of this paper used numerical modelling techniques to calculate stress intensity factors for spatial defects. The aim of this research was to determine the values of fracture toughness of a faulty massive body and to apply such values to simulate fatigue cracking in structural materials, and in particular in refractory materials for steelmaking. The authors established some practically relevant properties of the relationship between fracture toughness (stress intensity factor) and the arrangement of defects to each other. They also established that the reference values of this parameter, which had been determined earlier for flat periodic defect groups (microcracks and pores), were not applicable.

Keywords: modelling, stress intensity, fatigue cracks, refractory materials.



УДК 620.193

И.Е. Илларионов, Д.А. Пестряев,
Ш.В. Садетдинов, И.А. Стрельников
ФГБОУ ВО «Чувашский государственный
университет им. И. Н. Ульянова»
г. Чебоксары, Россия
E-mail: tmlp@rambler.ru
Дата поступления 06.05.2019

РАЗРАБОТКА БОРАТФОСФАТНЫХ МОЮЩИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН В РЕМОНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация

Получены экспериментальные данные по влиянию фосфатборатных соединений – фосфаттринатрийпентабората (ФНТПБ), фосфатнатрийтетрабората (ФНТБ) и фосфанатрийдимертабората (ФНДМБ) на моющую способность, смачиваемость и противокоррозионные свойства 3%-х водных растворов синтетических моющих средств МЛ-52, МС-8 и Лабомид-203. Испытания показали, что введение ФНТПБ, ФНТБ и ФНДМБ в количестве 5 г/л в растворы МЛ-52, МС-8 и Лабомид-203, позволяют улучшить технологические свойства известных моющих средств. На основе полученных данных разработаны композиции: МЛ-52+ФНТПБ; МЛ-52+ФНТБ; МЛ-52+ФНДМБ; Лабомид-203+ФНТПБ; Лабомид-203+ФНТБ; Лабомид-203+ФНДМБ; МС-8+ФНТПБ; МС-8+ФНТБ; МС-8+ФНДМБ, которые являются эффективными БФМС и рекомендованы для очистки загрязненной поверхности деталей в ремонтном производстве машин на металлургических заводах.

Ключевые слова: МЛ-52, Лабомид-203, МС-8, фосфаттринатрийпентаборат, фосфатнатрийтетраборат, фосфанатрийдимертаборат, боратфосфатное моющее средство, моющая способность, противокоррозионное свойство, металлургические машины.

Введение

В процессе эксплуатации металлургических машин на наружных и внутренних поверхностях деталей откладываются технологические загрязнения в виде смазок, масел, жидких углеводородов и продуктов коррозии. В ремонтном производстве на металлургических заводах для очистки загрязненной поверхности деталей применяют синтетические моющие средства (СМС). Практика показывает, что наибольшее распространение на ремонтных предприятиях получил способ химической очистки с применением моющих растворов МЛ-52, МС-8, Лабомид-203. Анализ научно-технической литературы показывает, что для повышения технологических свойств СМС к ним добавляют различные присадки [1-3]. Для повышения моющих и противокоррозионных свойств добавляют бораты, фосфаты которые характеризуются высоким ингибирующим эффектом по отношению к стали в водно-солевых средах и

условиях атмосферы [4-8]. Известно также, что комплексные соединения обладают, как правило, более высокими моющими и противокоррозионными свойствами, чем их составляющие в отдельности [9]. Поэтому исследование влияния боратфосфатных соединений на технологические свойства водных растворов МЛ-52, МС-8, Лабомид-203 и разработка на их основе эффективных боратфосфатных моющих средств (БФМС), представляют научно-практический интерес.

Основная часть

БФМС являются композицией МЛ-52, МС-8 и Лабомид-203 с боратфосфатными соединениями: фосфаттринатрийпентаборат (ФНТПБ) молекулярной формулы $3\text{NaB}_5\text{O}_8 \cdot \text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; фосфатнатрийтетраборат (ФНТБ) – $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и фосфанатрийдимертаборат (ФНДМБ) – $2\text{NaBO}_2 \cdot \text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, взятыми в отдельности. Методика синтеза вышеуказанных фосфатборатных соединений и их физико-

химические свойства описаны в работах [10,11].

При исследовании моющей способности моющих средств использовали моделирующее эксплуатационное загрязнение (МЭЗ), представляющее пастообразную смесь нефтешлама, масла и отработанной водной эмульсии, применяемой в металлообработке. Для испытаний была выбрана сталь марки Ст3 (ГОСТ 380-88), которая широко применяется в металлургическом машиностроении. Определение моющей способности проводили по методике [12,13]. Для этого на металлическую пластинку с предварительно подготовленной поверхностью наносили 0,1-0,2 г МЭЗ и пластинку промывали в испытуемом водном растворе БФМС в течение 30 минут при перемешивании и температуре раствора $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$. По окончании испытания пластинку извлекали из испытуемого моющего раствора, сушили на воздухе и взвешивали. По разности масс пластинки до и после испытания вычисляли моющую способность БФМС в мас.%. Наряду с моющими свойствами БФМС определяли их смачивающую способность, которую фиксировали визуально в виде нарушения

сплошности водяной пленки на поверхности металла. Смачивающая способность характеризуется временем в секундах от начала испытаний до разрыва водяной пленки [14].

Исследования по влиянию боратфосфатных соединений в зависимости от концентрации на моющую способность и смачиваемость 3%-х растворов МЛ-52, МС-8 и Лабомид-203, показали, что наиболее эффективной является добавка в количестве 5 г/л.

Результаты сравнительных испытаний моющей способности и смачиваемости стали Ст.3 в водных растворах МЛ-52, Лабомид-203, МС-8 и БФМС представлены в таблице. Из представленных данных таблицы следует, что добавление боратфосфатных соединений повышает моющее свойство и смачиваемость известных моющих средств, которые взяты для эксперимента.

В результате испытаний было выяснено, что моющая способность разработанных БФМС в среднем больше на 12,5% по сравнению с МЛ-52, Лабомид-203, МС-8, а смачиваемость улучшается на 11,1%.

Таблица

Моющая способность и смачиваемость синтетических моющих средств

Синтетическое моющее средство	Моющая способность, %	Смачиваемость, с
3%-й раствор МЛ-52	76,2	24
3%-й раствор МЛ-52 + 5г/л ФНТПБ	87,7	26
3%-й раствор МЛ-52 + 5г/л ФНТБ	88,6	27
3%-й раствор МЛ-52 + 5г/л ФНДМБ	89,8	27
3%-й раствор Лабомид-203	77,6	25
3%-й раствор Лабомид-203 + 5г/л ФНТПБ	89,1	27
3%-й раствор Лабомид-203 + 5г/л ФНТБ	90,2	28
3%-й раствор Лабомид-203 + 5г/л ФНДМБ	91,1	28
3%-й раствор МС-8	78,2	26
3%-й раствор МС-8 + 5г/л ФНТПБ	89,7	28
3%-й раствор МС-8 + 5г/л ФНТБ	90,6	28
3%-й раствор МС-8 + 5г/л ФНДМБ	91,8	29

Данные по влиянию боратфосфатных соединений на противокоррозионные свойства растворов МЛ-52, Лабомид-203, МС-8 получены путем измерения стационарных потенциалов с помощью высокоомного вольтметра потенциостата П-5848. Электродный потенциал стали Ст3 через 24 ч в 3%-м водном растворе МЛ-52 равен $-0,38$ В; в 3%-м водном растворе Лабомид-203 – $(-0,34$ В); а в 3%-м водном растворе МС-8 – $0,32$ В; Введение боратфосфатных соединений в количестве 5г/л облагораживает электродные потенциалы стали, они становятся более положительными и их значения равны: МЛ-52+ФНТПБ ($-0,25$ В); МЛ-52+ФНТБ ($-0,22$ В); МЛ-52+ФНДМБ ($-0,21$ В); Лабомид-203+ФНТПБ ($-0,21$ В); Лабомид-203+ФНТБ ($-0,19$ В); Лабомид-203+ФНДМБ ($-0,18$ В); МС-8+ФНТПБ ($-0,19$ В); МС-8+ФНТБ ($-0,16$ В); МС-8 + ФНДМБ ($-0,12$ В). Из полученных данных видно, что противокоррозионные свойства БФМС выше, чем у растворов МЛ-52, Лабомид-203 и МС-8.

Исследования процесса коррозии стали Ст3 в испытуемых растворах моющих средств гравиметрическим методом и вычисленные значения степени защиты (Z), коэффициента торможения (γ) [15,16] дали следующие результаты. Скорость коррозии (K) стали Ст3 после 24 и 120 ч испытаний составляла, $\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$: $0,0614$ и $0,0297$ в растворе МЛ-52; $0,0492$ и $0,0194$ в растворе Лабомид-203; $0,0382$ и $0,0125$ в растворе МС-8. В растворах БФМС при концентрации боратфосфатных соединений 5г/л эти значения равны, $\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$: $0,0204$ и $0,0059$ (раствор МЛ-52+ФНТПБ); $0,0125$ и $0,0052$ (раствор МЛ-52+ФНТБ); $0,0029$ и $0,0020$ (раствор МЛ-52+ФНДМБ); $0,0184$ и $0,0050$ (раствор Лабомид-203+ФНТПБ); $0,0104$ и $0,0043$ (раствор Лабомид-203+ФНТБ); $0,0027$ и $0,0014$ (раствор Лабомид-203+ФНДМБ); $0,0124$ и $0,0032$ (раствор МС-8+ФНТПБ); $0,0093$ и $0,0018$ (раствор МС-8+ФНТБ); $0,0019$ и $0,0007$ (раствор МС-8+ФНДМБ). В растворах БФМС степень защиты (Z) составляет от 79,84% до 93,72%, а коэффициент торможения (γ) – от 4,89 до 15,68 (после 120 часов испытания). Из представленных данных следует, что

растворы БФМС являются более эффективными противокоррозионными средствами, чем МЛ-52, Лабомид-203 и МС-8. Измерение значений pH растворов БФМС показало, что среда более щелочная (от 8,4 до 9,2), чем растворов МЛ-52, Лабомид-203 и МС-8. Наибольшую ингибирующую коррозию металла способность БФМС, можно объяснить подщелачиванием раствора и образованием на поверхности металла более плотной пассивной феррогидроксофосфатборатной пленки.

На рисунке 1 приведены анодные и катодные потенциодинамические поляризационные кривые стали Ст3 полученные по методике [17,18].

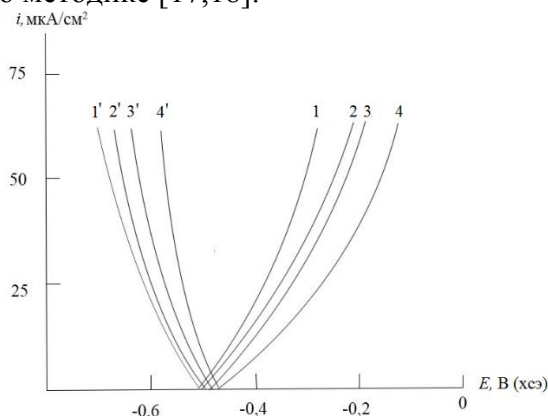


Рисунок 1. Анодные и катодные потенциодинамические поляризационные кривые стали Ст3 в 3%-м водном растворе МС-8 (1 и 1') и в растворах БФМС: (МС-8+ФНТПБ – 2 и 2'; МС-8+ФНТБ – 3 и 3'; МС-8+ФНДМБ – 4 и 4').

Данные электрохимических исследований, согласно рисунку 1, показывают смещение потенциала растворения металла в положительную сторону относительно $E_{\text{кор}}$ в фоновом растворе и преимущественное замедление анодного процесса, что согласуется с научными литературными данными [19-24].

Заключение

На основе полученных экспериментальных данных разработаны моющие композиции: МЛ-52+ФНТПБ; МЛ-52+ФНТБ; МЛ-52+ФНДМБ; Лабомид-203+ФНТПБ; Лабомид-203+ФНТБ; Лабомид-203+ФНДМБ; МС-8+ФНТПБ; МС-

8+ФНТБ; МС-8+ФНДМБ, которые являются эффективными БФМС и рекомендованы для очистки загрязненной поверхности деталей в ремонтном производстве машин на металлургических заводах.

Библиографический список

1. Тельнов А. Ф., Козлов Ю.С., Кузнецов О. К., Тулаев И. А. Моющие средства, их использование в машиностроении и регенерация. – М.: «Машиностроение», 1993. – 202 с.
2. Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В., Илларионов И.Е. Разработка синтетических моющих средств на основе боратов для очистки поверхности металла: Монография. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – 185 с.
3. Моющая композиция для очистки металлических поверхностей: пат. 2629023. Рос. Федерация. Илларионов И.Е., Фадеев И.В., Ременцов А.Н., Садетдинов Ш.В. № 2016143245; заявл. 02.11.2016; опубл. 24.08.2017, бюл. № 24.
4. Исламутдинова А.А., Гайдукова И.В. Получения и защитные свойства ингибиторов коррозии на основе бор-, азот-содержащих соединений // Журнал в мире научных открытий. – 2010. – № 4. – Часть 6. – С. 23-24.
5. Фадеев И.В., Ременцов А.Н., Садетдинов Ш.В. Моющие и противокоррозионные свойства синтетических моющих средств для узлов и деталей в присутствии некоторых боратов // Грузовик. – 2017. – № 1. – С. 17-20.
6. Левашова В.И., Янгирова И.В., Казакова И.В. Обзор ингибиторов коррозии на основе борорганических соединений // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. [Электронный ресурс]. – URL: <http://science-education.ru/pdf/2014/6/135.pdf>
7. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Фадеев И.В. Системы из боратов аммония с некоторыми солями, аминами и амидами: Монография. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – 232 с.
8. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В. Коррозия черных металлов в средах, имитирующих условия эксплуатации автомобилей // Черные металлы. – 2019. – № 4. – С. 67-72.
9. Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В. Синергетический эффект пентаборатов лития, натрия и калия в присутствии аминоспиртов в синтетических моющих средствах // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 3(46). – С. 49-55.
10. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Стрельников И.А., Гартфельдер В.А. Влияние фосфатборатных соединений на противокоррозионную устойчивость углеродистой стали в нейтральных водных средах // Черные металлы. – 2018. – № 5. – С. 47-53.
11. Фадеев И.В., Новоселов А.М., Садетдинов Ш.В. Теоретические основы разработки новых ингибиторов коррозии для автотранспортного комплекса // Вестник МАДИ. 2014. – № 4(39). – С. 17- 21.
12. Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В. Новые моющие средства для узлов и агрегатов автотранспортных средств // Автотранспортное предприятие. – 2014. – № 6. – С. 54-56.
13. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Фадеев И.В. Физико-химические основы для разработки синтетических моющих средств на основе боратов для очистки поверхности металла // В сборнике: «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве» материалы III Международной научно-практической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 8-14.
14. Фадеев И.В., Ременцов А.Н., Мороз С.М., Садетдинов Ш.В. Разработка композиции технологической жидкости для увеличения долговечности деталей и узлов транспортных средств// Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – № 3(50). – С. 90-97.
15. Jiang X., Zheng Y.G., Ke W. Effect of flow velocity and entrained sand on inhibition performances of two inhibitors for CO₂ corrosion of N80 steel in 3% NaCl

- solution //Corrosion Science. 2005. no. 47. pp. 2636-2658.
16. Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В. Влияние моноборатов лития, натрия, калия на моющие и противокоррозионные свойства синтетических моющих средств // Приволжский научный журнал. – 2015. – № 2(34). – С.86-90.
 17. Фадеев И.В., Ременцов А.Н., Садетдинов Ш.В. Влияние моноэтаноламин-тетраборатааммония в составе защитного покрытия на электрохимическое поведение стали 08 кп // Грузовик. – 2016. – № 12. – С. 15-20.
 18. Фадеев И.В., Половняк В.К., Еремеева С.С., Садетдинов Ш.В. Влияние амидоборатных соединений на противокоррозионные свойства стали // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 3. – С.19-24.
 19. Вигдорович В.И., Синютина С.Е. Универсальный ингибитор коррозии и наводороживания углеродистой стали Ст3 в средах, содержащих H₂S и CO₂. // Вестник ТГТУ. –2008. –Т. 14. – № 1. – С. 128-139.
 20. Ashassi-Sorkhabi, H. Corrosion inhibition of mild steel by some schiff base compounds in hydrochloric acid // H. Ashassi-Sorkhabi, B. Shaabani, D.Seifzadeh // Applied Surface Science. – 2005. –№ 239. – P. 154-164.
 21. Кузнецов Ю.И. Прогресс в науке об ингибиторах коррозии // Коррозия: металлы, защита. – 2015. – № 3. – С. 12-14.
 22. Lendvay-Gyorik G., Meszaros G., Lengyel B. In Proceedings of the 9 th European Symposium on Corrosion Inhibitors // Ferrara University. Ferrara. –2000. – № 2. –725 p.
 23. Фахрутдинова А.Р., Мукалдисов Н.И., Елпидинский А.А. и др. Составы ингибиторов коррозии для различных сред // Вестник Казанского технологического университета. Казань: 2013. – Вып. 4. –Т. 16. – С.272-276.
 24. Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В., Половняк В.К. Исследование растворимости и ингибиторного действия систем моно-, тетра-, пентаборат натрия – этилендиамин – вода при 25°C // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С.13-17.

Information about the paper in English

I.E. Illarionov, D.A. Pestryaev, Sh.V. Sadetdinov, I.A. Strelnikov
 Ulyanov Chuvash State University
 Cheboksary, Russia
 E-mail: tmlp@rambler.ru
 Received 06.05.2019

DEVELOPING BORATE-PHOSPHATE DETERGENTS FOR CLEANING METALLURGICAL EQUIPMENT AS PART OF THE MAINTENANCE SCOPE

Abstract

This experimental study produced some data indicating how phosphate-borate compounds – such as phosphate trisodium pentaborate (PSTPB), phosphate sodium tetraborate (PSTB) and phosphasodium dimetaborate (PSDMB) – influence the cleaning power, wettability and rust-inhibiting properties of the 3% aqueous solutions of the synthetic detergents ML-52, MS-8 and Labomid-203. The experiments showed that the above mentioned compounds, when introduced in the solutions of ML-52, MS-8 and Labomid-203 in the amount of 5 g/l, enhanced the performance of the known detergents. The following compositions were developed on the basis of the collected data: ML-52+ PSTPB; ML-52+PSTB; ML-52+PSDMB; Labomid-203+PSTPB; Labomid-203+PSTB; Labomid-203+PSDMB; MS-8+PSTPB; MS-8+PSTB; MS-8+PSDMB. They provide effective borate-phosphate detergents recommended for use as cleaning compounds for metallurgical machinery.

Keywords: ML-52, Labomid-203, MS-8, phosphate trisodium pentaborate, phosphate sodium tetraborate, phosphasodium dimetaborate, borate-phosphate detergent, cleaning power, rust-inhibiting property, metallurgical machinery.



УДК 621.793.74: 519.873

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 22.05.2019

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ОТ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАЗМОТРОНА

Аннотация

Со стороны экономической целесообразности восстановление деталей, в частности с помощью газотермической обработки, обусловлено тем, что около половины деталей, поступающие на ремонтные работы, могут быть использованы после восстановления при его себестоимости на 15...30% от цены новых деталей. При этом стоит отметить, что лишь 5...9% деталей не подлежат восстановлению. Одним из перспективных способов восстановления изношенных деталей является плазменное напыление. В данной статье разработаны уравнения определения кинематических режимов плазменного напыления, в частности, скорости перемещения плазмотрона для сложнопрофильных поверхностей деталей. Кроме того, смоделирована система уравнений для прогнозирования распространения тепла в деталях при плазменном напылении. Разработана система уравнений по прогнозированию толщины нанесенного слоя после плазменного напыления на поверхности деталей.

Ключевые слова: плазменное напыление, теплофизические параметры, температура нагрева, толщина напыления, кинематика, плазмотрон.

Введение

На сегодняшний день технология плазменного напыления является одним из самых технологичных, экономичных и эффективных процессов нанесения износостойкого покрытия с помощью высококонцентрированного потока энергии. Краткая характеристика показателей напыления и процесса формирования плазменного слоя представлены на рисунке 1.

При контакте плазменной струи с поверхностью детали протекают различные физико-химические и теплофизические процессы. Одним из основополагающих параметров, характеризующих процесс плазменного напыления и качество получаемого покрытия, является температура нагрева поверхности восстанавливаемой детали. При этом необходимо учитывать, что нанесение множества слоев с контроли-

руемой геометрией формообразования возможно при условии точного математического прогнозирования. Из чего следует, что в областях методологического планирования при использовании плазменных технологий можно вынести конкретные проблемные вопросы, относящиеся к конкретной детали и её функциональному слою [1-3].

Данная работа посвящена исследованию физико-механических и теплофизических параметров плазменного напыления и их зависимости от траектории перемещения плазмотрона.

Цель данной работы состоит в разработке системы уравнений для прогнозирования распространения тепла в сложнопрофильных деталях при плазменном напылении, а также системы уравнений по прогнозированию толщины нанесенного плазменного слоя.

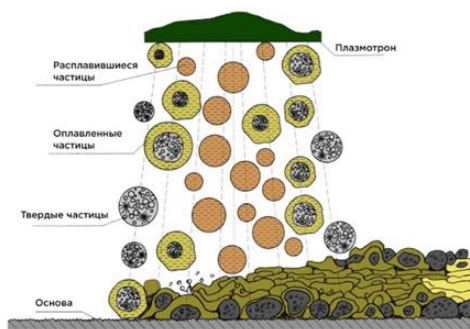


Рисунок 1. Характеристика процесса плазменного напыления

Основная часть

Уравнение процесса распространения тепла от плазменной струи в обрабатываемой детали определяется [4,5]:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi\lambda v} \times \frac{\exp(z_1/(4at))}{\sqrt{t(t_0 + t)}} \quad (1)$$

где, T – температура нагрева детали (K); T_0 – температура тела (K); y, z_1 – глубина пятна нагрева (m); t – время ($сек$); t_0 – длительность распространения фиктивного источника ($сек$); Q – эффективная мощность плазменной дуги (Bm); v – скорость перемещения инструмента (плазмотрона) (m/c); λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности.

На основе ряда работ [6-7] было получено уравнение для расчета толщины плазменного слоя детали:

$$H = \frac{\delta \times \sqrt{\pi \rho_1}}{v} \times \left\{ \exp\left(-\left(x^2/\rho_1^2\right)\right) + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \right\} \quad (3)$$

где, δ – коэффициент, характеризующий скорость увеличения толщины покрытия в центре пятна распыла; A – шаг смещения (m).

Как видно из формул (1) и (3) одним из важных факторов, влияющих на величину толщины наносимого слоя и температуру нагрева детали при плазменном напылении, является скорость перемещения плазмотрона v относительно обрабатываемой поверхности.

Поэтому, опираясь на работы [8-10], была разработана таблица определения скорости перемещения плазмотрона для различных поверхностей деталей.

$$H_{(x,y)} = H_{(x)} = H_{\max} \times \exp\left(-\left(x^2/\rho_1^2\right)\right) \quad (2)$$

где, $H_{\max}$ – высота напыленного покрытия (m); x – координата движения сопла плазмотрона относительно плоскости напыления детали (m); ρ_1 – радиус пятна распыла (m).

Как показывает практика детали промышленности, требующие восстановления и упрочнения, имеют значительные габаритные размеры. Вследствие этого при напылении контактной поверхности количество рядов нанесенного плазменного покрытия будет наверняка более трех. Поэтому для трех и более рядов напыления, высота напыленного слоя может быть рассчитана по формуле [7]:

где, ρ, φ, z – цилиндрические координаты; β – шаг спирали траектории перемещения центра пятна напыления по поверхности; β_z – шаг проекции траектории перемещения центра пятна напыления на ось z ; $tg\psi$ – угол раскрытия конуса; R – радиус цилиндра (m); D – внешний диаметр винтовой линии (m); D_1 – диаметр винтовой линии не подвергавшейся плазменной обработке (m); φ_1 – угол крутизны подъема; α – угол выреза; $d\varphi/dt$ – скорость вращения обрабатываемой детали (m/c); dz/dt – продольная скорость перемещения инструмента (m/c); $d\rho/dt$ – радиальная скорость перемещения инструмента (m/c).

Определение скорости перемещения плазмотрона

№ п/п	Типовая поверхность	Уравнение скорости перемещения плазмотрона
1.	Дисковая	$v_d = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dt}\right)^2 + \beta\varphi^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2}$
2.	Коническая	$v_k = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dt}\right)^2 + (\operatorname{tg}\psi\beta_z\varphi)^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$
3.	Цилиндрическая	$v_u = \sqrt{R^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$
4.	Винтовая	$v_v = \sqrt{\left(\frac{\pi\left(\sqrt{D^2(1+\operatorname{tg}\varphi_1)} - D_1^2(1+\operatorname{tg}\varphi_1)\right)}{\alpha}\right)^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$

Схема напыления приведенных типовых поверхностей деталей представлена на рисунке 2.

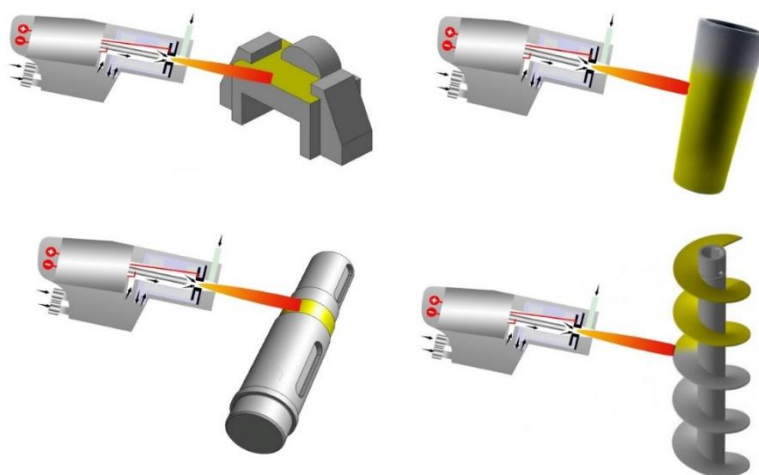


Рисунок 2. Схема напыления типовых поверхностей деталей машин

Результаты и их обсуждение

С помощью формулы (1) можно спрогнозировать температуру нагрева детали, но для более точного значения температуры при плазменном напылении стоит внести некоторые математические корректировки.

Опираясь на результаты работ [11-13] уравнение для определения коэффициента теплопроводности:

$$\alpha = \lambda / c\rho_{nn} \quad (4)$$

где, c – теплопроводность (Bm/mK); ρ_{nn} – плотность плазменного покрытия ($кг/м^3$).

Коэффициент теплопроводности определим с помощью уравнения Лихтенкера [14,15]:

$$\lambda = \lambda_M^{1-P} \times \lambda_B^P \quad (5)$$

Учитывая внесенные математические корректировки и смоделированные уравнения скорости перемещения плазмотрона, выводим систему уравнений для прогнозирования температуры нагрева деталей при плазменном напылении:

$$\begin{aligned}
T_o &= \frac{Q}{2\pi\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P\sqrt{(d\rho/dt)^2 + \beta\varphi^2(d\varphi/dt)^2}} \times \frac{\exp\left(z_1c\rho_{nn}/(4t\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P)\right)}{\sqrt{t(t_0+t)}} + T_0 \\
T_u &= \frac{Q}{2\pi\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P\sqrt{R^2(d\varphi/dt)^2 + (dz/dt)^2}} \times \frac{\exp\left(z_1c\rho_{nn}/(4t\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P)\right)}{\sqrt{t(t_0+t)}} + T_0 \\
T_k &= \frac{Q}{2\pi\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P\sqrt{(d\rho/dt)^2 + (tg\psi\beta_z\varphi)^2(d\varphi/dt)^2 + (dz/dt)^2}} \times \frac{\exp\left(z_1c\rho_{nn}/(4t\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P)\right)}{\sqrt{t(t_0+t)}} + T_0 \\
T_e &= \frac{Q}{2\pi\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P\sqrt{\left(\frac{\pi\left(\sqrt{D^2(1+tg\varphi_1)} - D_1^2(1+tg\varphi_1)\right)}{\alpha}\right)^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}} \times \frac{\exp\left(\frac{z_1c\rho_{nn}}{4t\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P}\right)}{\sqrt{t(t_0+t)}} + T_0
\end{aligned} \quad (6)$$

Опираясь на полученные уравнения по определению скорости перемещения плазмоторна для различных поверхностей деталей, была смоделирована система уравнений по определению толщины плазменного слоя для сложнопрофильных поверхностей детали:

$$\begin{aligned}
H_o &= \frac{\delta \times \sqrt{\pi\rho_1}}{\sqrt{(d\rho/dt)^2 + \beta\varphi^2(d\varphi/dt)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{\rho_1^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \right\} \\
H_k &= \frac{\delta \times \sqrt{\pi\rho_1}}{\sqrt{(d\rho/dt)^2 + (tg\psi\beta_z\varphi)^2(d\varphi/dt)^2 + (dz/dt)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{\rho_1^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \right\} \\
H_u &= \frac{\delta \times \sqrt{\pi\rho_1}}{\sqrt{R^2(d\varphi/dt)^2 + (dz/dt)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{\rho_1^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \right\} \\
H_e &= \frac{\delta \times \sqrt{\pi\rho_1}}{\sqrt{\left(\frac{\pi\left(\sqrt{D^2(1+tg\varphi_1)} - D_1^2(1+tg\varphi_1)\right)}{\alpha}\right)^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{\rho_1^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \right\}
\end{aligned} \quad (7)$$

Выводы

Разработаны уравнения для определения скорости перемещения плазмоторна для различных поверхностей деталей.

Учитывая уравнения по определению коэффициентов температуропроводности и теплопроводности, а также уравнения для определения скорости перемещения плазмоторна для деталей, была разработана система уравнений для прогнозирования распространения тепла в обрабатываемых сложнопрофильных деталях при плазменном напылении.

Разработана система уравнений для прогнозирования и последующего контроля толщины нанесенного плазменного

слоя на сложнопрофильные поверхности деталей.

Библиографический список

1. Леонов С.Л., Ситников А.А., Татаркин М.Е. Моделирование износа наплавленных поверхностей деталей // Ползуновский альманах. 2012. №1. С.228–229.
2. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
3. Соснин Н.Е., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2013. 406 с.

4. Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск: Наука и техника, 1971. 265 с.
5. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск. Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
6. Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И. Толщина покрытия детали при плазменном напылении // Научно-практический журнал «Современные материалы, техника и технологии». №1 (16). 2018 г. С. 77–82.
7. Влияние кинематики движения инструмента на формирование износостойкого покрытия / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова Г.И. Трифонов и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т.14. №5. 2018. С. 142–147.
8. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпози́тов». 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. 360 с.
9. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый и др. Минск: Беларус. навука, 2011. 357 с.
10. Жачкин С.Ю., Астахов М.В. Износостойкие покрытия для восстановления и изготовления деталей машин // Технология металлов: Ежемес. производственный, научно-техн. и учебно-метод. журнал. Москва 2005. № 1. С. 40–43.
11. Жачкин С.Ю., Нелысов С.В. Повышение микротвердости дисперсно-упрочненных композитных покрытий на основе железа. Наука в центральной России. 2016. № 6. С. 49–54.
12. Системный анализ при моделировании напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при нанесении композитных покрытий методом ГКО / С.Ю. Жачкин, А.Н. Пеньков, Г.В. Зибров и др. // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2013. № 6. С. 63–67.
13. Соснин Н.А., Ерамков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб: Изд-во Политехи, ун-та, 2013. 406 с.
14. Негода Е.Н. Тепловые процессы при сварке: учеб. пособие. Дальневосточный государственный технический университет. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. 125 с.
15. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

Information about the paper in English

G.I. Trifonov

Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy
Voronezh, Russia

E-mail: grishakip@yandex.ru

Received 22.05.2019

UNDERSTANDING THE RELATIONSHIP BETWEEN THE THERMOPHYSICAL AND PHYSICO-MECHANICAL PARAMETERS OF PLASMA SPRAYING AND THE TRAVEL RATE OF THE PLASMATRON

Abstract

In cost-effectiveness terms, rebuilding parts (in particular, by gas-thermal spraying) is justified by the fact that almost half of the parts submitted for repair can be rebuilt and reused, and the rebuild cost amounts to 15...30% of the cost of new parts. It should be noted that only 5...9% of parts cannot be rebuilt. One of the innovative rebuild techniques includes plasma spraying. This paper offers some equations for defining the kinematic modes of plasma spraying, and namely for defining the travel rate of the plasmatron when handling parts with complex surface geometry. The authors came up with a system of equations for predicting the propagation of heat in parts during plasma spraying. A system of equations was also developed for predicting the resultant thickness of a plasma sprayed surface layer.

Keywords: plasma spraying, thermophysical parameters, heating temperature, spray coat thickness, kinematics, plasmatron.



УДК 621.774.2

С.В. Самусев, В.А. Фадеев
Национальный исследовательский
технологический институт «МИСиС»
г. Москва, Россия
E-mail: fdv_viktor@mail.ru
Дата поступления 14.02.2019

КОНСТРУКЦИЯ ТРУБОЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО АГРЕГАТА 30-50 И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ ПРЯМОШОВНЫХ СВАРНЫХ ТРУБ

Аннотация

Для изучения непрерывных процессов формовки труб малого и среднего диаметров применяются различные методы исследования, один из методов основывается на прямом физическом моделировании процесса на реальном металле. Отсутствие специализированного оборудования ограничивает изучение и исследование непрерывных процессов формовки. Для устранения этого недостатка на кафедре ОМД «НТИУ МИСиС» спроектирован и изготовлен трубоэлектросварочный стан 30-50. В статье представлена конструкция трубоэлектросварочного стана 30-50, на котором можно реализовать основные производственные схемы непрерывной формовки труб. Конструкция клеток трубоэлектросварочного стан 30-50 обеспечивает совместимость с разными комплектами сменного рабочего инструмента, что открывает возможности физического моделирования и исследования процессов формовки, сварки, калибровки, редуцирования и профилирования сварных труб. Выполнен расчет контактного взаимодействия трубной заготовки и валкового инструмента, изготовленного по однорадиусной калибровке. Определено положение катающего диаметра, который разделяет площадь контактного взаимодействия на зоны опережения и отставания.

Ключевые слова: трубоэлектросварочный агрегат, труба, прямошовные трубы, формовка, кинематические параметры, силовые параметры.

Введение

Для изучения процессов непрерывной формовки труб применяются различные методы исследования с различными компоновками оборудования.

В настоящей статье типовые станы трубоэлектросварочных агрегатов (ТЭСА) для производства сварных труб непрерывным способом представлены на базе экспериментального стана ТЭСА 30-50 – НТИУ «МИСиС».

Типовые станы ТЭСА для производства сварных труб (основные производственные схемы) представлены на рисунке 1 [1].

На базе ТЭСА 30-50 могут быть реализованы следующие схемы:

- схема 1 представлена компоновкой клеток для получения сварных труб круглого сечения (формовочный стан) – сварочный стан – калибровочный стан;

- на схеме 2 представлена компоновка клеток для получения сварных труб круглого сечения (формовочный стан) – сварочный стан – редуциционный стан;

- на схеме 3 представлена компоновка клеток для получения сварных труб круглого сечения (формовочный стан) – сварочный стан – профилировочный стан;

На рисунке 2 приведены компоновки оборудования станом ТЭСА 30-50 для непрерывной формовки сварных прямошовных труб. На базе представленной главной линии могут быть реализованы все основные производственные компоновки [2].

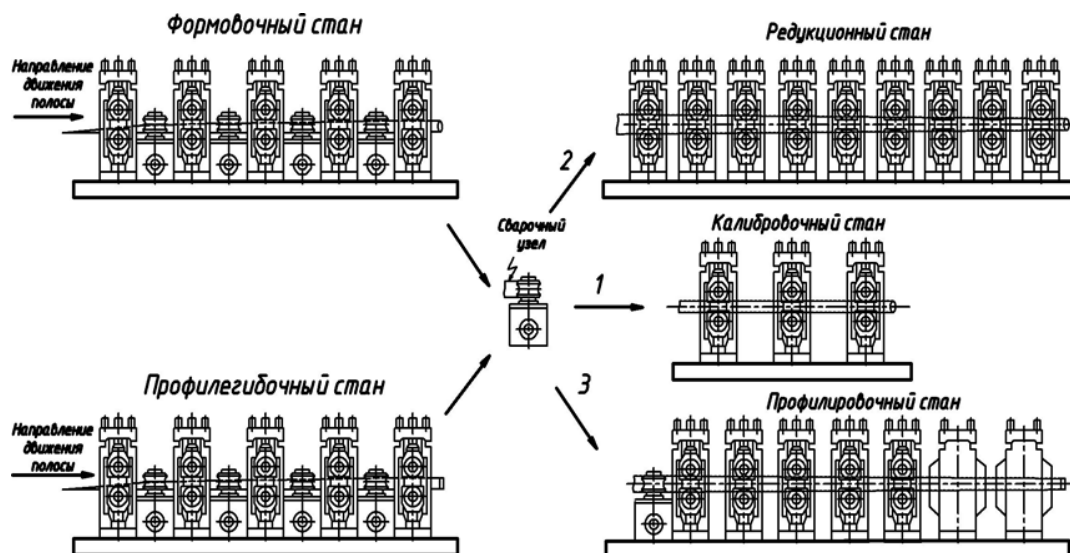


Рисунок 1. Типовые станы (производственные схемы) трубоэлектросварочных агрегатов

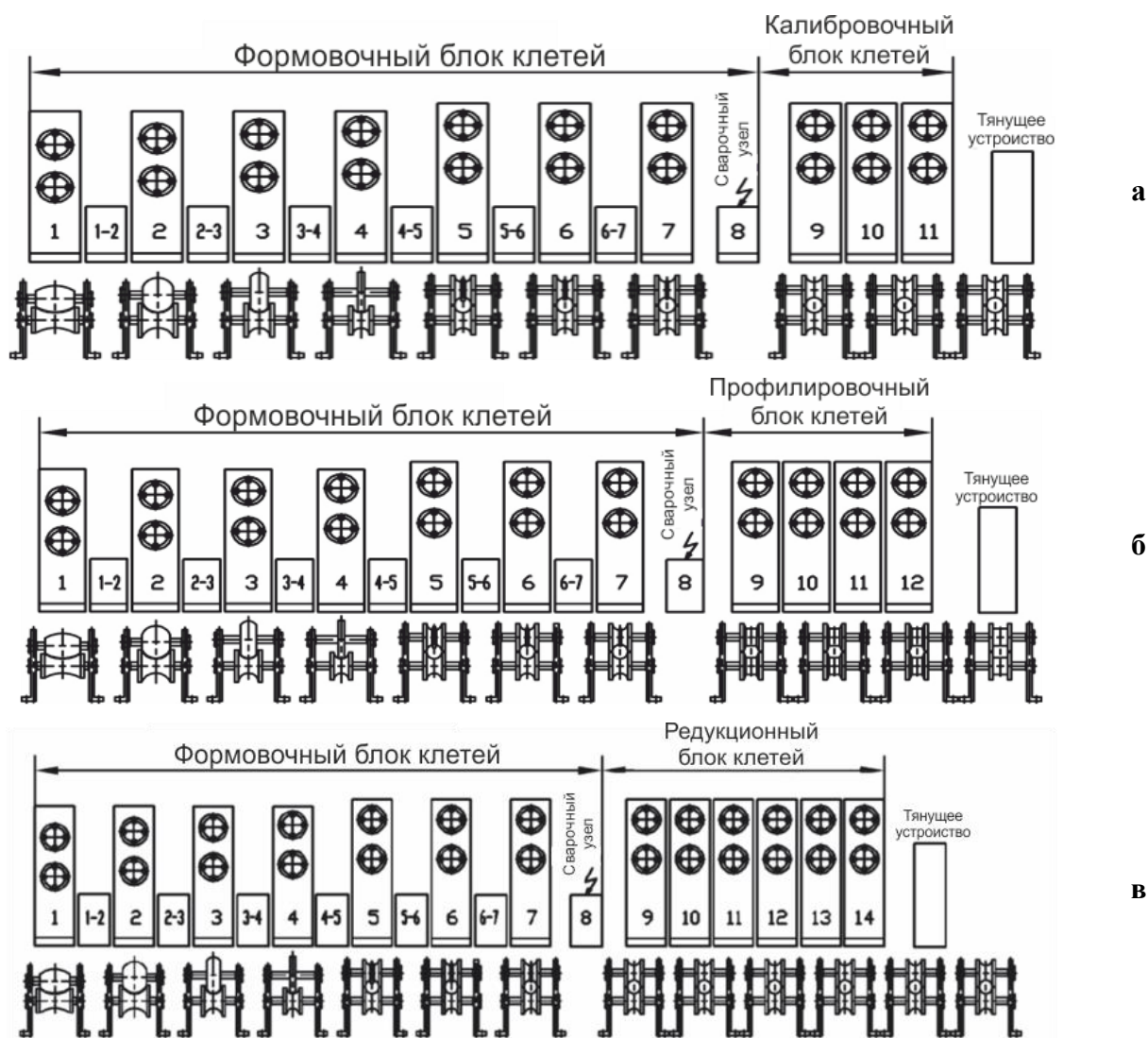


Рисунок 2. Основные производственные компоновки: а) компоновка клеток для получения сварных труб круглого сечения; б) компоновка клеток для получения сварных профилированных труб из круглой заготовки; в) компоновка клеток для получения сварных холодно-редуцированных труб

Основная часть

ТЭСА 30-50 позволяет реализовать как типовые, так и нестандартные компоновки клеток. Это достигается путем заданного размещения рабочих клеток на плитовинах, на которых монтируются скомпонованные в определенной последовательности клетки. Конструкция клеток тренажера обеспечивает совместимость с разными комплектами сменного рабочего инструмента, что открывает возможности физического моделирования и исследования процессов формовки, сварки, калибровки, редуцирования и профилирования сварных труб.

Изменяя компоновку рабочих клеток и сменив комплект инструмента в главной линии тренажера можно моделировать различные технологические процессы и схемы формоизменения при производстве сварных труб, некоторые из которых представлены ниже.

На рисунке 2а исходная стальная полосовая заготовка деформируется в формовочном блоке клеток. Затем сведение кромок осуществляется в сварочном узле. Далее сформованная круглая трубная заготовка из формовочно - сварочного блока поступает в калибровочный блок.

На рисунке 2б исходная стальная полосовая заготовка деформируется в формовочном блоке клеток и на выходе из блока клеток имеет сечение, близкое к кругу. Затем осуществляется сведение кромок в сварочном узле. Далее круглая трубная заготовка поступает в профилирующий блок клеток. Получение сварной профильной трубы реализуется путем размещения блока профилирующих клеток.

На рисунке 3в стальная полосовая заготовка деформируется в формовочном блоке клеток. Затем сведение кромок осуществляется в сварочном узле. Далее сформованная круглая трубная заготовка из формовочно-сварочного блока поступает в редуцирующий блок.

В настоящее время для изучения процессов непрерывной формовки труб применяются различные методы исследования. К ним можно отнести компьютерное моделирование и физическое моделирование на

действующем оборудовании. Компьютерное моделирование технологии и оборудования процесса формовки труб позволяет разрабатывать новые компоновки рабочих клеток станом ТЭСА и получать результаты процесса формоизменения листовой заготовки на этом оборудовании. Технические параметры процесса сложно проверить на реальном металле и оборудовании из-за напряженной производственной программы в цехе. Экспериментальное оборудование должно соответствовать выбранной компьютерной модели, чего сложно добиться ввиду широкого множества компоновок формовочных клеток и валкового инструмента.

Для возможности проверки результатов исследования на кафедре ОМД МИСиС разработан и спроектирован трубоэлектросварочный стан ТЭСА 30-50 (рисунок 3), реализующий схемы компоновок по рисункам 1,2.

Трубоэлектросварочный стан 30-50 состоит из рамы -1, на которую установлены формовочные клетки - 2. Каждая клетка оборудована шаговыми двигателями - 3 и тензодатчиками - 4. Шаговые двигатели перемещают по вертикали валковые узлы с точностью позиционирования до 0,05 мм. Тензодатчики измеряют усилие формовки (максимально допустимое усилие 50 кН). Программное обеспечение рисунок 4 позволяет управлять расположением валкового инструмента и фиксировать усилие формовки в каждой клетке.

Программа строит график усилия формовки по клетям. Валковый инструмент выполнен по однорадиусной калибровке. Привод выполнен в виде зубчатой передачи от мотора-редуктора - 5. Крутящий момент передается между клетями с помощью дюймовой приводной цепи. Сдвоенная приводная звездочка установлена на консольном участке нижнего вала. ТЭСА 30-50 и позволяет создавать типовые и нестандартные компоновки клеток.

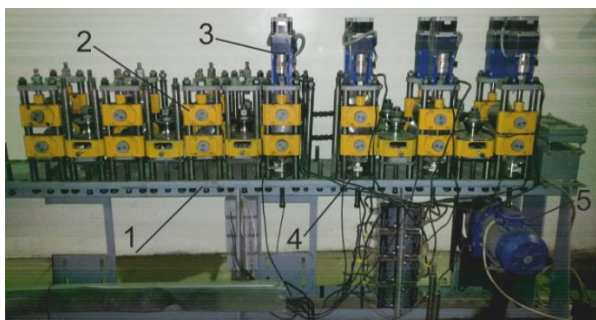


Рисунок 3. Трубоэлектросварочный стан 30-50

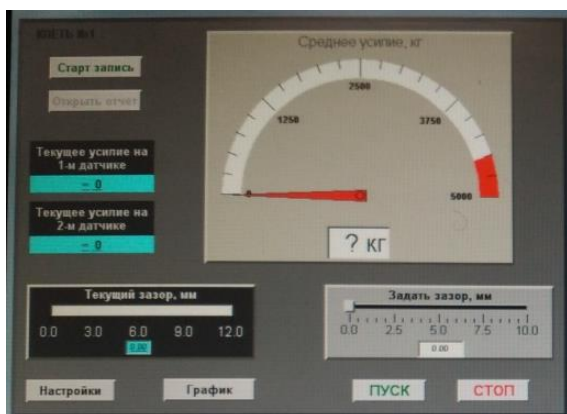


Рисунок 4. Окно программы управления и фиксирования параметров

Конструкция формовочной клетки (рисунок 5) состоит из двух валков - 1, относительно подшипниковой опоры на валке смонтированы дистанционные втулки - 2 между подшипниками и валком. В подушках - 3 установлены подшипниковые опоры (радиальные сферические двухрядные роликоподшипники). Валковый узел смонтирован на стержнях - 4, закрепленных в раме тренажера.

Узел эджера (рисунок 6) состоит из эджерных валков - 1, установленных на оси - 2. Ось зафиксирована в приводной кассете - 3, которая установлена в раме - 4 с возможностью перемещения в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси формовки. Регулировка горизонтального перемещения осуществляется с помощью регулировочного винта 5 с маховиком.

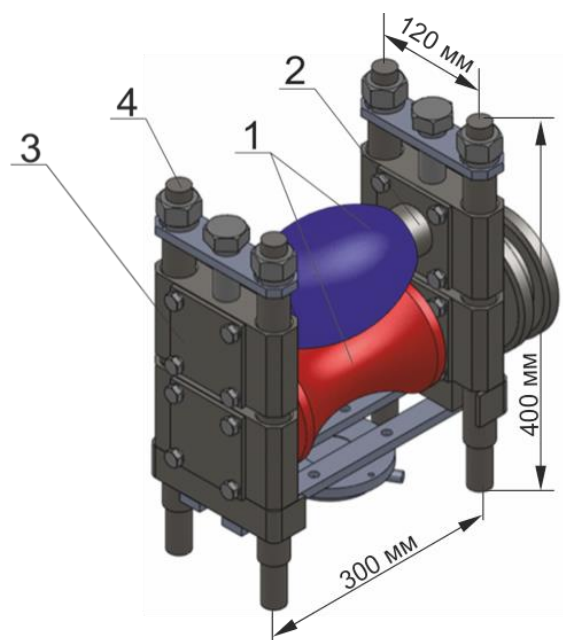


Рисунок 5. Горизонтальная формовочная приводная клетка.

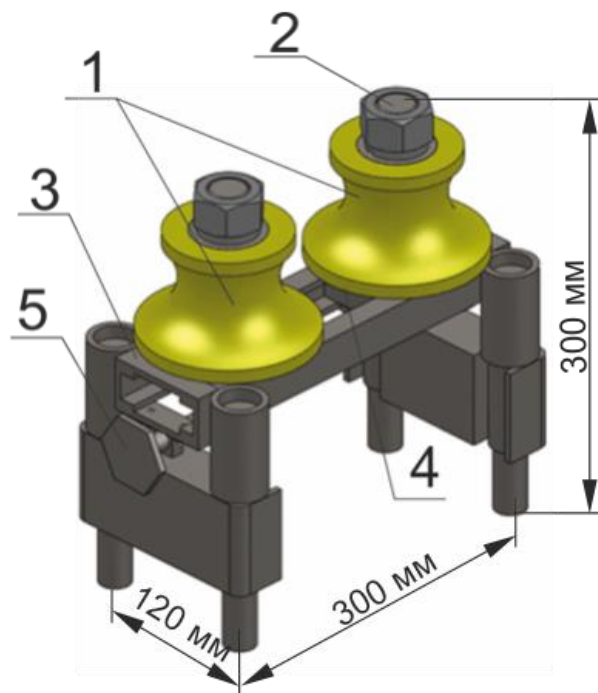


Рисунок 6. Конструкция эджерной клетки.

В настоящее время на ТЭСА 30-50 используется комплект инструмента, выполненный по однорядной схеме сворачивания для трубы диаметром 50 мм [3]. В таблице 1 представлены геометрические параметры валкового инструмента.

Таблица 1

Геометрические характеристики валкового инструмента

№ формовочной клетки	Rн, мм	φ, рад	Rв, мм	Вк, мм	Вв, мм	Днд, мм	Днр, мм	Двд, мм	Двр, мм
1	140	1,19	139	167	150	70	120	120	76,
2	70	2,38	69	134	120	70	160	150	82,1
3	48	2,8	47	93,3	80	70	160	170	125,3
4	37	4,51	36	70	40	70	150	190	177,8
5	32,4	5,31	32,4	63	63	70	120	70	120
6	29,9	5,58	29,9	58,9	58,9	70	120	70	120
7	28,1	5,79	28	55,8	55,86	70	120	70	120

Качество изготовления труб определяется техническими параметрами формовки. К основным техническим параметрам относятся: габаритные размеры валкового инструмента и настройка калибров, напряженно-деформированное состояние трубной заготовки, скорость формовки (кинематические параметры, размеры контактных площадей валков с заготовкой) и силовые параметры процесса.

Заданные величины деформаций по клетям формовочного стана являются необходимым, но недостаточными для производства качественных труб на станах непрерывных ТЭСА. Некоторые компоновки клеток и схемы деформации могут привести к искажению очага деформации из-за неравномерного распределения тянущих усилий по приводным калибрам, что может привести к некачественной формовке, поэтому важным является определение и регулировка силовых и кинематических параметров процесса формоизменения трубной заготовки. Силовые и кинематические параметры процесса формоизменения заготовки в калибрах деформационного стана возникают на контактных площадях ТЗ с инструментом [4].

Катающий диаметр определяет положение и значения зон опережения и отставания по площадкам контактного взаимодействия заготовки и валкового инструмента. Положение катающего диаметра определяется для валков калибра приводной клетки. В расчете определяли положение катающего диаметра, в сечении которого линейная скорость валка и полосы равны.

Сечение катающего диаметра калибра делит контактную площадь на тянущие и тормозящие зоны по верхнему и нижнему валкам [4].

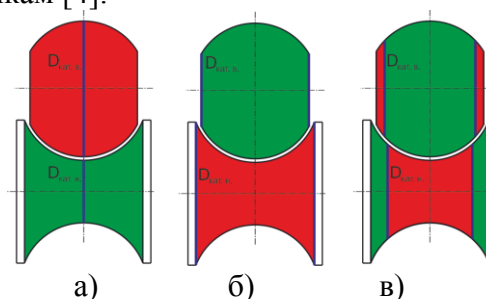


Рисунок 7. Варианты расположения катающего диаметра (синий цвет):

- а) катающий диаметр по середине калибра;
- б) катающий диаметр по краям валков;
- в) катающий диаметр по - середине валков калибра

В первом случае (а) вся контактная площадь нижнего валка находится в зоне опережения (зеленый цвет, тянущие усилия приложены по ходу формовки заготовки), поскольку все диаметры нижнего валка больше значения катающего диаметра. Для верхнего валка картина обратная. Поскольку все диаметры верхнего валка меньше по значению катающего диаметра этого валка, контактная площадь находится в зоне отставания (красный цвет; тянущие усилия направлены против движения заготовки). Такое распределение тянущих усилий обеспечивает формовку и продвижение заготовки из калибра с одновременным изгибом профиля выходящей из калибра заготовки вверх.

Во втором случае (б) вся контактная

площадь нижнего вала находится в зоне отставания, поскольку все диаметры нижнего вала меньше значения катающего диаметра. Для верхнего вала картина обратная, поскольку все диаметры верхнего вала больше значения катающего диаметра этого вала. Такое распределение тянущих усилий стремиться сформовать и продвинуть профиль с изгибом профиля выходящего из калибра заготовки в низ.

В третьем случае (в) контактные площади нижнего и верхнего валков делятся на две зоны. Зоны, в которых значения диаметров больше значения катающего диаметра вала, являются зонами опережения. Зоны, в которых значения диаметров меньше значения катающего диаметра вала, являются зонами отставания.

Расчет проводили по методикам [5-7]:

Радиус первого вала в сечении кромки заготовки, мм:

$$R_{1к} = \frac{D_1^H}{2} + R_1^H \left(1 - \cos \frac{B}{2 \cdot R_1^H}\right),$$

где - D_1^H – диаметр нижнего вала по дну, мм; R_1^H – радиус формовки нижнего вала, мм; B – ширина заготовки, находящейся в контакте с валком, мм.

Высота профиля, мм:

$$H_1 = R_1^H \left(1 - \cos \frac{B}{2 \cdot R_1^H}\right),$$

Длина контакта кромки с валком, мм:

$$L_{1к}^H = R_1^H \cdot \sin \left(\frac{\theta_1}{2}\right),$$

Длина контакта кромки с валком с учетом 10% распружинивания, мм:

$$l_{1к}^H = 0,1 \cdot L_{1к}^H,$$

Определение катающего диаметра валков первой клетки:

$$D_{1к} = \frac{V_L \cdot 1000}{\omega \cdot 60},$$

Угловая скорость:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \text{ рад/с},$$

Определение тянущих усилий валков:

- тянущее усилие гiba, обеспечивающее получение трубной заготовки с заданными геометрическими параметрами калибра:

$$T_{\Gamma} = \tau \cdot \left(\frac{S_{\Gamma}}{2R_i} - \frac{S_{\Gamma}}{2R_{i-1}} \right) \cdot \frac{S_{\Gamma}}{2} \cdot B$$

$$\text{где } \tau = \frac{\sigma_{\Gamma}}{\sqrt{3}}$$

- тянущее усилие, необходимое для продвижения трубной заготовки, находящейся в контакте с данным калибром:

$$T_{\kappa} = \tau \cdot (F_{\text{от}} - F_{\text{оп}}) \cdot f,$$

Следовательно,

$$T_{\Gamma} = T_{\Gamma}^B + T_{\Gamma}^H;$$

$$T_{\Gamma}^B = T_{\Gamma}^B + T_{\kappa}^B = \tau \cdot \left(\frac{S_{\Gamma}}{2R_i} - \frac{S_{\Gamma}}{2R_{i-1}} \right) \cdot$$

$$\frac{S_{\Gamma}}{2} \cdot B + \tau \cdot (F_{\text{от}}^B - F_{\text{от}}^H) \cdot f;$$

$$T_{\Gamma}^H = T_{\Gamma}^H + T_{\kappa}^H = \tau \cdot \left(\frac{S_{\Gamma}}{2R_i} - \frac{S_{\Gamma}}{2R_{i-1}} \right) \cdot$$

$$\frac{S_{\Gamma}}{2} \cdot B + \tau \cdot (F_{\text{от}}^H - F_{\text{от}}^B) \cdot f;$$

Результаты расчетов для первой клетки представлены в таблице 2.

На рисунке 8 представлены контактные площади трубной заготовки с верхним и нижним валками и тянущие усилия для первой клетки.

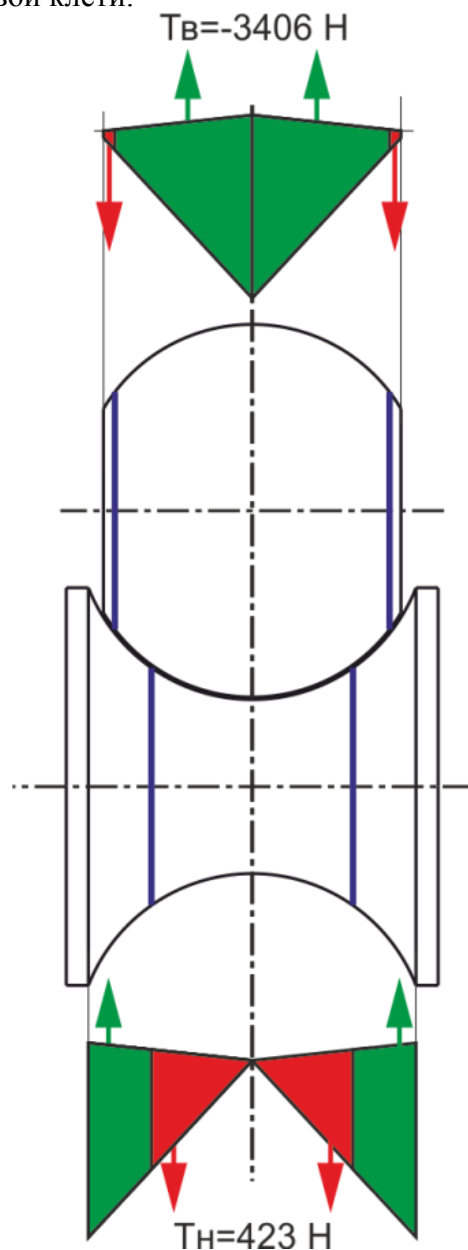


Рисунок 8 - Контактные площади трубной заготовки с верхним и нижним валками и тянущие усилия

Таблица 2

Результаты расчетов первой для первой клетки

Частота вр. вала	Линей- ная ско- рость	Угловая скорость, рад./с.	Кат. Диам. мм	F в.опр, мм2	Fв.отс, мм2	Fн.опр, мм2	Fн.отс, мм2	Тв, Н	Тн, Н
30	10	3,14	106,15	3234,	860,7	1075,5	3114,8	-3406,9	423,8

Таблица 3

Результаты расчетов для всех клеток формовочного стана

	Площади ТЗ с верхним валком						
	1	2	3	4	5	6	7
F в.опр, мм²	3234	4828	3770	2631	255	210	181
Fв.отс, мм²	861	227	-84	-548	1080	1269	1304
	Площади ТЗ с нижним валком						
	1	2	3	4	5	6	7
Fн.опр, мм²	1076	2492	1462	675	255	210	174
Fн.отс, мм²	3115	2631	2328	1960	1436	1371	1323
	Тянущие усилия по клетям						
	1	2	3	4	5	6	7
Тв, Н	2181	383	989	1402	1258	1217	1197
Тн, Н	-2278	-4411	-3695	-2544	947	1175	1200
Сумма	-97	-4028	-2707	-1142	2206	2392	2397

Результаты расчетов для всех клеток формовочного стана представлены в таблице 3.

Заключение

1. Представлены типовые схемы производства прямошовных сварных труб малого диаметра в линии ТЭСА и компоновки рабочего оборудования станов ТЭСА на базе ТЭСА 30-50 НИТУ "МИСиС".

2. Рассмотрены особенности конструкции рабочих клеток формовочного стана (рабочей приводной горизонтальной клетки и эджерной холостой клетки ТЭСА 30-50).

3. Представлена калибровка рабочего инструмента валков для трубы Ø 50 мм и рассмотрены типовые случаи расположения катающего диаметра относительно валков калибра и силовые условия выхода

сформованного профиля заготовки из калибра.

4. Для первого калибра ТЭСА 30-50 представлен расчет кинематических и силовых параметров для трубы $\varnothing$ 50мм и распределение тянущих усилий по контактными площадям.

7. Выполнены расчеты для всех приводных клеток формовочного стана ТЭСА 30-50 для трубы $\varnothing$ 50мм.

Библиографический список

1. Сборник докладов Международного научно-технического конгресса "ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии" Москва: МИСиС, 2014, 514 с.
2. Самусев С.В., Больдт В.В., Веремеевич А.Н. Исследование контактного взаимодействия металла с инструментом при профилировании сварной заготовки Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2009. № 11. С. 17-19.
3. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Вавилкин Н.М., Самусев С.В. Трубное производство, Учебник, 2-е изд., испр. и доп. - М.: Изд. дом МИСиС, 2011. - 970 с.
4. Самусев С.В., Фортунатов А.Н., Фролова Н.А., Пашкова Н.Г. Методы расчета калибровок инструмента и энергосиловых параметров процесса производства сварных труб в линии прессов и ТЭСА: сборник задач – ВФ МИСиС, 2006, 115с.
5. Коликов А.П., Романенко В.П., Самусев С.В., и др. Машины и агрегаты трубного производства, М.: МИСиС, 1998, 536 с.
6. Cai, Liu, Zhiwu, Han, Lele, Zhang, Weiping, Lu, Numerical modelling of the roll forming process of channel steel, Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 1999, 12 (3), pp. 173-177
7. Paralikas J., Salonitis K., Chrysosolouris G. Energy efficiency of cold roll forming process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 66, Issue 9-12, 2013, pp 1271-1284.

Information about the paper in English

S.V. Samusev, V.A. Fadeev
National University of Science and Technology MISIS
Moscow, Russian Federation
E-mail: fdv_viktor@mail.ru
Received 14.02.2019

DESIGN OF THE ERW PIPE MILL 30-50 AND DEFINITION OF THE KINEMATIC PARAMETERS AND FORCES INVOLVED IN THE PRODUCTION OF LSAW PIPES

Abstract

Different study methods are applied when studying the continuous pipe forming process used in the production of small- and medium-diameter pipes. One of such methods is based on direct physical simulation of the process using actual steel. The lack of specialized equipment limits research into continuous pipe forming processes. To eliminate this constraint, the Department of Metal Forming at MISIS designed and built an ERW pipe mill 30-50. This paper describes the design of the ERW pipe mill 30-50, which can be used to implement the main continuous pipe forming routes. The stand design of the ERW pipe mill 30-50 is compatible with different sets of removable tools enabling to physically simulate and study such processes as forming, welding, sizing, reducing and shaping of welded pipes. Contact interaction was calculated between a pipe shell and rolls of a single radius design. The position of the effective diameter was determined that divides the contact interaction area into forward slip and backward slip zones.

Keywords: ERW pipe mill, pipe, LSAW pipes, forming, kinematic parameters, forces.



УДК 621.838.222

М.П. Шишкарёв
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет» (ДГТУ)
г. Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Дата поступления 15.04.2019

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ СО СМЕШАННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Аннотация

На основе синтезированных структурно-функциональной и принципиальной схем адаптивной фрикционной муфты с положительно-отрицательной обратной связью, действующей в режиме параллельного автоматического регулирования, разработана математическая модель, позволившая исследовать зависимость предельного вращающего момента муфты от коэффициента трения и коэффициента усиления обратной связи.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, положительно-отрицательная, коэффициент трения, обратная связь, коэффициент усиления, точность срабатывания.

Введение

В работах [1, 2] приведены результаты исследований адаптивной фрикционной муфты (АФМ) со смешанной отрицательно-нулевой обратной связью. Муфта имеет две фрикционные группы, одна из которых охвачена обратной отрицательной связью по возмущающему воздействию [3] – коэффициенту трения между элементами фрикционных пар. На вторую фрикционную группу обратная связь не действует, т. е. имеет место так называемая «нулевая» обратная связь, и значение ее момента сил трения изменяется прямо пропорционально значению коэффициента трения.

Благодаря этой особенности, как отмечено в указанных работах, точность срабатывания муфты повышается по сравнению с АФМ первого поколения (типа муфты Н.Д. Вернера [4]) на 25...30 %.

Исследование показало, что АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью может работать в режиме с положительной обратной связью [3], т. е. когда задающее (усилие пружинного или другого типа замыкателя пар трения) и управляющее воздействия на входе сумматора имеют одинаковые знаки. При этом из работы выключается обратная отрицательная связь, а управляющее воздействие (распорная (отжимная) сила) управляющего устройства (УУ)

муфты становится больше, чем задающее воздействие, при увеличении возмущающего воздействия.

Данный режим работы не характерен для муфт подобного типа, поскольку при ее существующей конструктивно-компоновочной схеме приводит к резкому уменьшению точности срабатывания и может иметь место в том случае, когда значение коэффициента усиления (КУ) обратной отрицательной связи превышает его предельное (максимальное) значение.

Причина данного явления объясняется прогрессирующим увеличением момента сил трения дополнительной фрикционной группы (ДФГ) в результате повышения силы нормального давления на поверхностях трения в условиях роста значения коэффициента трения [2].

Характерной особенностью упомянуто АФМ является комбинированный сигнал на входе сумматора УУ, состоящий из выходного сигнала основной фрикционной группы (ОФГ), охваченной обратной отрицательной связью, и выходного сигнала ДФГ, которая не охвачена обратной связью.

АФМ с обратной отрицательной связью (АФМ первого поколения), а также АФМ с комбинированной обратной связью, включающей обратную отрицательную связь, обладают характерной особенностью

стью, заключающейся в том, что их точность срабатывания повышается с увеличением КУ [4]. В связи с этим ограничение максимального значения КУ в АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью, обусловленное изменением режима работы муфты, приводит к соответствующему ограничению ее максимальной точности срабатывания.

Максимальная точность срабатывания АФМ данного типа в ряде случаев практического применения не отвечает современным требованиям, предъявляемым к устройствам защиты приводов машин от перегрузок.

В работе [5] приведены результаты исследования АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью косвенного регулирования. Входной сигнал УУ обратной отрицательной связи в данной АФМ формируется за счет ДФГ, которая не охвачена обратной связью (т. е. имеет место нулевая обратная связь). Вследствие этого входной сигнал УУ и его выходной сигнал изменяются сильнее при изменении коэффициента трения, что приводит, как показало исследование, к повышению точности срабатывания АФМ.

Как показали расчеты, точность срабатывания исследованной АФМ также недостаточна для того чтобы в ряде случаев практического применения обеспечить надежную защиту деталей и узлов привода машины от выхода их из строя.

Как показали исследования, АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью и косвенным регулированием обеспечивает максимальное значение вращающего момента внутри интервала изменения коэффициента трения, исключая его граничные значения. Это достигается при определенных значениях КУ, причем максимальной точностью срабатывания АФМ обладает при значении КУ, близком к предельному. Это свидетельствует о том, что перепад значений максимального вращающего момента и момента, соответствующего одному из граничных значений коэффициента трения, значителен, что говорит о недостаточно высокой точности срабатывания АФМ.

Увеличение выходного сигнала ДФГ

и, соответственно, входного сигнала УУ приводит к более значительному уменьшению момента сил трения ОФГ при определенном увеличении коэффициента трения. Это свидетельствует о том, что значение коэффициента трения, соответствующее максимальному вращающему моменту АФМ, будет смещено в область меньших значений.

Как показали исследования АФМ, нагрузочная характеристика которых имеет максимум внутри интервала изменения коэффициента трения, именно указанное обстоятельство косвенно свидетельствует о более высокой точности срабатывания АФМ.

Изложенное выше является предпосылкой для теоретического обоснования применения принципа косвенного регулирования на основе комбинированной – положительно-отрицательной обратной связи, каждая компонента которой работает с другой компонентой в параллельном режиме.

На основе изложенного, **задача исследования** заключается в синтезе структурно-функциональной и принципиальной схем АФМ с положительно-отрицательной обратной связью параллельного действия с косвенным регулированием, а также установлении зависимостей для определения оптимальных значений параметров обратной связи, позволяющих получить максимальную точность срабатывания муфты.

Основная часть

Принцип косвенного регулирования предполагает структурную независимость УУ обратной связи и ОФГ. Структурно-функциональная схема АФМ, удовлетворяющая указанной особенности муфты, приведена на рисунке 1. Муфта состоит из двух фрикционных групп – основной (ОФГ) и дополнительной (ДФГ) (все обозначения приведены на схеме). Выходной сигнал ДФГ в форме вращающего момента T_2 поступает в УУ, выходной сигнал которого в форме распорной силы $F_p(t)$ (t – время) подается на сумматор сигналов С.

На сумматор также поступает сигнал F_n – задающее воздействие нажимного

устройства УН. Задающее воздействие необходимо для первоначального возбуждения силы трения между поверхностями

трения ДФГ в те периоды времени, когда нагрузка, передаваемая АФМ, невелика и меньше номинальной нагрузки.

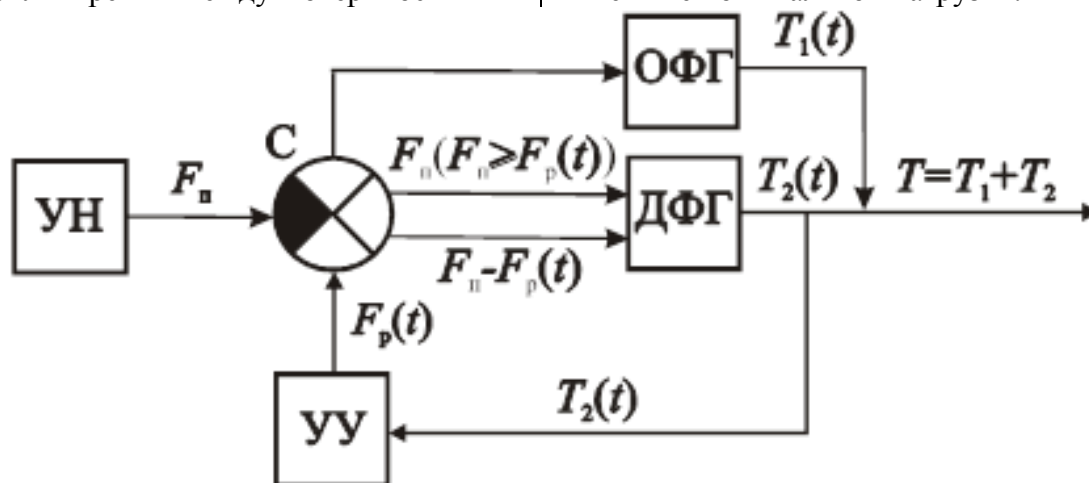


Рисунок 1. Структурно-функциональная схема АФМ со смешанной обратной связью параллельного действия

Входные сигналы $F_p(t)$ и F_n имеют одинаковые знаки, в соответствии с чем на выходе сумматора С возможно появление выходного сигнала следующего вида:

– F_n , если выполняется условие

$$F_n \geq F_p(t).$$

Данное условие выполняется в том случае, когда внешняя (по отношению к АФМ) нагрузка не превышает номинальный вращающий момент муфты, равный ее минимальному вращающему моменту [6];

– $F_n - F_p(t)$ – во всех остальных случаях.

Выходной сигнал УУ поступает в ОФГ, следовательно, на ОФГ действует обратная отрицательная связь.

Одновременно с этим выходной сигнал УУ поступает в ДФГ, вызывая действие на нее в режиме работы положительной обратной связи. В этом случае выходной сигнал имеет вид $F_p(t)$ или в эквивалентной форме – $F_n + \Delta F_p(t)$ (где $\Delta F_p(t)$ – прирост распорной силы УУ), а данное действие обеспечивается тем же УУ, которое создает обратную отрицательную связь. Таким образом, УУ АФМ по функциональному назначению является комбинированным.

Выходной параметр АФМ – предельный вращающий момент T – является сум-

мой вращающего момента T_2 и вращающего момента T_1 ОФГ (рис. 1), причем ОФГ не участвует в возбуждении управляющего воздействия $F_p(t)$.

В зависимости от значения возмущающего воздействия $f(t)$, т. е. коэффициента трения между фрикционными парами ОФГ и ДФГ, изменяются предельный вращающий момент T_2 и управляющее воздействие $F_p(t)$, благодаря чему осуществляется автоматическое регулирование предельных значений вращающих моментов T_1 , T_2 и T .

Принципиальная схема АФМ со смешанной обратной связью и косвенным регулированием показана на рис. 2. Муфта состоит из полумуфт 1 и 2, которые кинематически связаны между собой двумя фрикционными группами – ОФГ, содержащей диски трения 3 и 4, и ДФГ, состоящей из фланца нажимного диска 5 и фрикционного диска 6.

Диски 3 смонтированы на стакане 7, который установлен на втулке 8, расположенной на ступице полумуфты 1 и связанной с ней посредством направляющей шпонки 9. Соединение дисков 3 со стаканом 7 осуществляется при помощи шлицев, благодаря чему обеспечивается возмож-

ность их перемещения в осевом направлении.

Диски 4 связаны аналогичным способом с барабаном полумуфты 2.

Нажимной диск 5 установлен на ступице полумуфты 1 с возможностью перемещения относительно нее в окружном и осевом направлениях, а фрикционный диск 6 связан с барабаном полумуфты 2 при помощи способа, аналогичного описанному выше.

Фрикционный диск 6 справа (по рисунку 2) опирается через упорный подшипник 10 на упор 11, жестко закрепленный на ступице полумуфты 1.

Силовое замыкание пар трения ОФГ

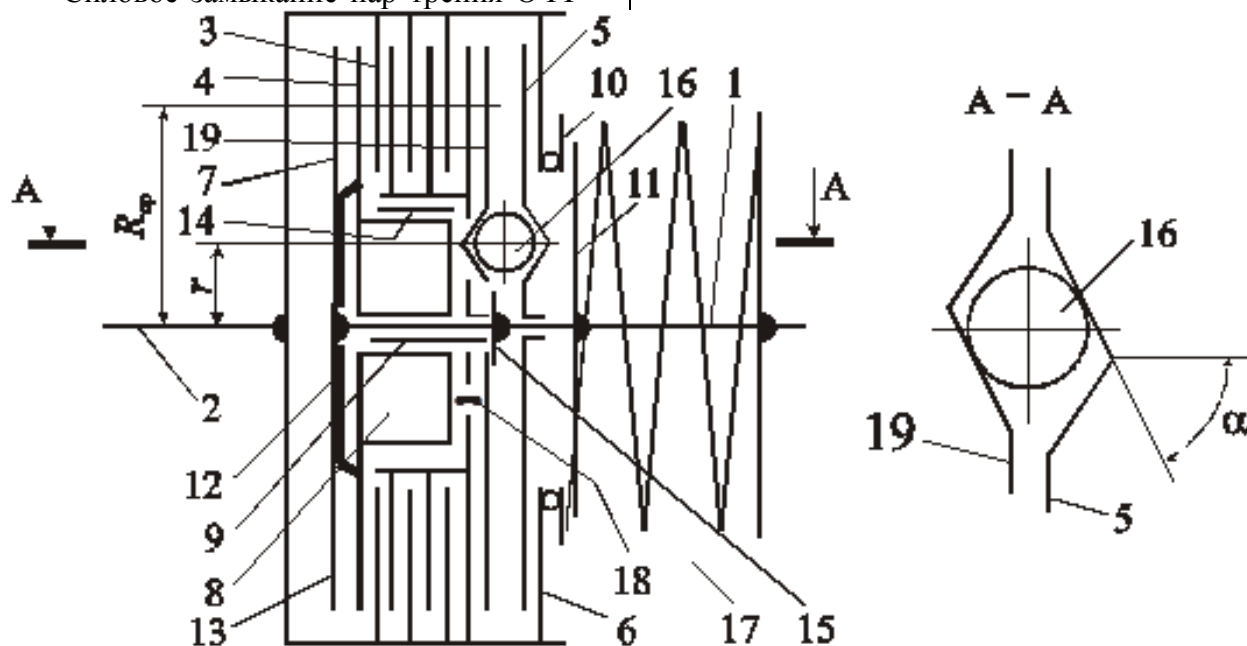


Рисунок 2. Принципиальная схема АФМ со смешанной обратной связью параллельного действия

УУ муфты состоит из тел качения (шариков) 16, которые размещены в гнездах со скошенными боковыми стенками нажимного диска 5 и втулки 8 (рис. 2, сечение А-А).

Для создания первоначального усилия замыкания пары трения ДФГ справа (по рис. 2) ее элементы поджаты пружиной 17, сила натяжения которой передается через упорный подшипник 10.

Толкатели 18 расположены в аксиальных отверстиях фланца стакана 7 между втулкой 8 и ведущим фланцем 19 нажимного диска 5.

Ведущий фланец 19 связан в окружном направлении со ступицей полумуфты 1

осуществляется при помощи тарельчатой пружины 12, расположенной между упорным диском 13, жестко закрепленным на ступице полумуфты 1, и фланцем втулки 8. Пакет дисков трения 3 и 4 в данном случае расположен между фланцем втулки 8 и фланцем стакана 7.

Связь в окружном направлении между стаканом 7 и втулкой 8 осуществляется при помощи направляющей шпонки 14. Справа стакан 7 опирается на упор 15, закрепленный на ступице полумуфты 1, благодаря чему исключается воздействие силы натяжения пружины 12 на элементы ДФГ.

при помощи шпонки 9 и, как и стакан 7, опирается справа (по рис. 2) на упор 15.

Таким образом, силовое замыкание пары трения ДФГ осуществляется как за счет действия пружины (при передаче минимальных нагрузок, когда распорная сила, возникающая в результате действия УУ, меньше силы пружины 17), так и за счет действия распорной силы УУ, если уровень передаваемых нагрузок такой, что распорная сила больше первоначальной силы натяжения пружины 17.

Передача нагрузки между полумуфтами 1 и 2 осуществляется по двум параллельным силовым потокам:

– от полумуфты 1 (в том случае, если

она ведущая) посредством шпонки 9 на втулку 8, затем на стакан 7 при помощи шпонки 14 на диски трения 3, которые за счет сил трения передают нагрузку на диски 4;

– от полумуфты 1 посредством шпонки 9 на втулку 8, затем при помощи шариков 16 – на нажимной диск 5, который посредством сил трения передает нагрузку на фрикционный диск 6, который передает нагрузку на полумуфту 2.

В соответствии с изложенным выше предельный вращающий момент, который без буксования может передавать муфта, определяется по следующей формуле:

$$T_n = T_{n1} + T_{n2}, \quad (1)$$

где T_{n1} – предельный вращающий момент, передаваемый парами трения ОФГ; T_{n2} – предельный вращающий момент, передаваемый парой трения ДФГ.

Вращающий момент, передаваемый дисками трения ОФГ, определяется по формуле:

$$T_{n1} = zR_{cp} f (F_{n1} - F_p), \quad (2)$$

где z – число пар поверхностей трения ОФГ; R_{cp} – средний радиус поверхностей трения дисков 3 и 4; f – текущий коэффициент трения; F_{n1} – первоначальная сила натяжения пружины 12; F_p – распорная (отжимная) сила, возникающая на шариках 16 при передаче нагрузки.

Если нагрузка, передаваемая муфтой, такова, что выполняется условие

$$F_p < F_{n2},$$

где F_{n2} – первоначальная сила натяжения пружины 17, то значение предельного вращающего момента, который в данный период времени может передать ОФГ, определяется по формуле:

$$T_{n1}^* = zR_{cp} f (F_{n1} - F_{n2}). \quad (3)$$

Для указанного периода времени предельный вращающий момент, передаваемый ДФГ, равен

$$T_{n2}^* = z_1 F_{n2} R_{cp} f, \quad (4)$$

где z_1 – число пар поверхностей трения ДФГ.

Суммируя, согласно формуле (1), правые части соотношений (3) и (4), находим

выражение для определения полного вращающего момента муфты:

$$T_n^* = R_{cp} f [zF_{n1} - (z - z_1)F_{n2}]. \quad (5)$$

Поскольку приведенное выше соотношение между силами F_p и F_{n2} выполняется не только при передаче небольших внешних (по отношению к муфте) нагрузок, но и при небольших значениях коэффициента трения, величина вращающего момента T_n^* оказывает существенное влияние на точность срабатывания муфты. Поэтому важным представляется обеспечение наибольшего значения вращающего момента T_n^* . Это может быть достигнуто следующими независимыми один от другого способами:

– одинаковыми или близкими друг к другу значениями параметров z и z_1 , при этом должно выполняться неравенство $z > z_1$;

– минимизацией значения силы F_{n2} .

В последнем случае минимальное значение силы F_{n2} может быть найдено по формуле (5). Учитывая, что, согласно данным работы [6], номинальное значение вращающего момента, передаваемого предохранительной фрикционной муфтой, в том числе АФМ, определяется при настройке муфты по минимальному значению коэффициента трения, заменим в формуле (5) параметр T_n^* на параметр T_n (T_n – номинальный вращающий момент муфты). Произведя математические преобразования, получаем:

$$F_{n2} = \frac{zF_{n1}R_{cp}f_{\min}T_n}{z - z_1}, \quad (6)$$

где $f_{\min}$ – минимальный коэффициент трения.

Таким образом, при передаче вращающего момента, не превышающего вращающий момент T_n , распорная сила УУ не должна быть больше, чем сила F_{n2} , вычисляемая по формуле (6). Поскольку основная фаза автоматического регулирования в муфте соответствует значениям коэффициента трения $f_i > f_{\min}$, представляется целесообразным, чтобы выполнялось равенство

$F_p = F_{n2}$ при передаче вращающего момента T_n . В этом случае на элементы трения ОФГ будет действовать наибольшая распорная сила $F_p(t)$, и автоматическое регулирование становится наиболее эффективным при увеличении коэффициента трения.

При условии $F_p(t) > F_{n2}$ момент сил трения ОФГ определяется по формуле, которая характерна для режима действия положительной обратной связи [7]:

$$T_{n2} = z_1 R_{cp} f (F_{n2} + F_p). \quad (7)$$

Обозначения параметров, входящих в формулу (7), приведены выше. В формуле (7) учтено, что на элементы трения ДФГ действует та же распорная сила, что и распорная сила, действующая на диски трения ОФГ. Значение параметра R_{cp} принято одинаковым для поверхностей трения ОФГ и ДФГ.

Величина распорной силы УУ определяется по формуле:

$$F_p = \frac{T_{n2}}{r} \operatorname{tg} \alpha, \quad (8)$$

где α – угол давления тел качения 16 (см. рис. 2, сечение А-А); r – радиус окружности, на которой расположены тела качения

16 (рис. 2).

Подставляя правую часть формулы (8) в уравнение (7) и решая последнее относительно неизвестного T_{n2} , находим:

$$T_{n2} = z_1 F_{n2} R_{cp} \frac{f}{1 - z_1 C f}, \quad (9)$$

где C – КУ обратной связи АФМ:

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

Формула (9) записана для тех случаев, когда $f > f_{\min}$.

Для определения вращающего момента T_{n1} необходимо найти выражение для вычисления распорной силы. С этой целью подставим в формулу (8) правую часть соотношения (9) и, произведя математические преобразования, найдем:

$$F_p = z_1 F_{n2} C \frac{f}{1 - z_1 C f}. \quad (10)$$

После подстановки правой части соотношения (10) в формулу (2) находим зависимость предельного вращающего момента ОФГ от коэффициента трения:

$$T_{n1} = z R_{cp} f \left(F_{n1} - z_1 C F_{n2} \frac{f}{1 - z_1 C f} \right). \quad (11)$$

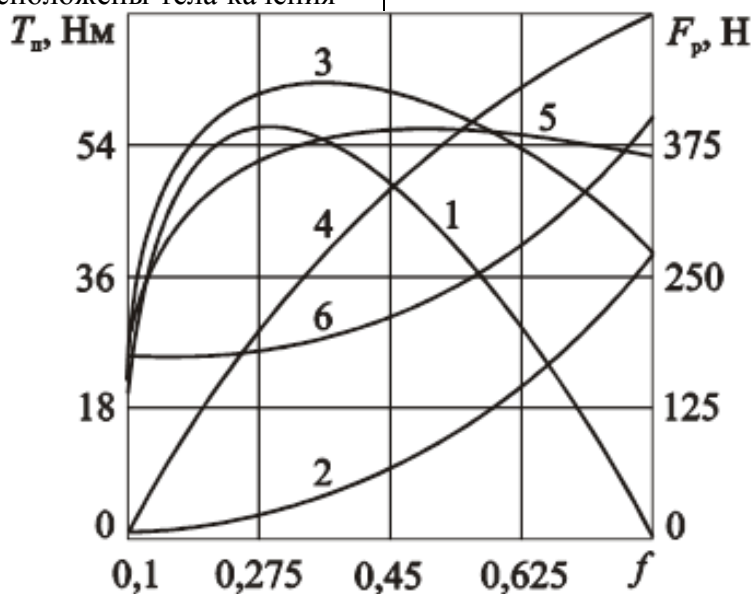


Рисунок 3. Зависимости полного вращающего момента АФМ, его составляющих и распорной силы от коэффициента трения

Графики зависимостей $T_{n1}(f)$ и $T_{n2}(f)$ показаны на рис. 3 (соответственно кривые 1 и 2). Графики построены по следующим значениям параметров: $z=4$, $z_1=1$,

$F_{n1}=500$ Н, $R_{cp}=0,1$ м, $C=1$. Значение силы F_{n2} определялось по формуле (6) и при $f_{\min}=0,1$ и $T_n=28$ Н·м составило $F_{n2}=1$ Н.

Для построения графиков минимальное значение силы F_{n2} было увеличено до 125 Н. В этом случае при максимальном значении коэффициента трения, равном $f_{\max}=0,8$, распорная сила F_p равна силе F_{n1} , а момент сил трения ОФГ обращается в ноль. Муфта в данном случае передает нагрузку только посредством пар трения ДФГ, а ее предельный вращающий момент становится минимальным при максимальном значении коэффициента трения. Это повышает точность срабатывания АФМ.

Кривая 3 на рис. 3 отражает изменение полного вращающего момента T_n АФМ.

Графики на рис. 3 показывают следующее:

- функция (11) имеет максимум внутри выбранного интервала значений коэффициента трения и обращается в ноль при максимальном значении коэффициента трения;

- изменение значения вращающего момента ДФГ носит линейный характер до значения коэффициента трения $f_k \approx 0,29$, затем – нелинейный прогрессирующий характер. Это объясняется тем, что в интервале значений коэффициента трения, равном $f_{\min} \dots f_k$, величина распорной силы F_p (кривая 4) меньше силы F_{n2} пружины 17 (прямая 5), поэтому в указанном интервале суммарная сила прижатия друг к другу пар трения ОФГ, равная $F_{n1} - F_{n2}$, и сила давления между элементами пары трения ДФГ постоянны.

В последнем случае указанная сила давления равна первоначальной силе натяжения пружины 17;

- предельный вращающий момент T_n АФМ, равный сумме вращающих моментов ОФГ и ДФГ, изменяется по закону, аналогичному закону изменения вращающего момента T_{n1} , и имеет максимальное значение, которое соответствует коэффициенту трения f_k (кривая 3);

- распорная сила F_p УУ обратной связи при минимальном значении коэффициента трения невелика, а ее изменение носит резко выраженный прогрессирующий

характер (кривая 4).

Значение распорной силы при построении графика определялось по формуле (8) с использованием следующих исходных данных: $\operatorname{tg} \alpha = 0,3$, $r = 0,03$ м.

Согласно приведенным на рис. 3 графикам значение коэффициента точности АФМ, вычисленное по формуле

$$K_T = \frac{T_{n.\max}}{T_{n.\min}}, \quad (12)$$

равно $K_T = 2,55$.

В формуле (12) параметр $T_{n.\max}$ – предельный вращающий момент АФМ, соответствующий значению коэффициента трения f_k , $T_{n.\min}$ – вращающий момент АФМ, соответствующий значению коэффициента трения $f_{\min}$.

Как показали результаты расчета, значение коэффициента точности АФМ приблизительно равно значению коэффициента точности АФМ с отрицательно-нулевой обратной связью и с косвенным регулированием [5].

Оценка возможности повышения точности срабатывания АФМ

С учетом особенностей внутрискруктурных связей, схемы действия сил в рассматриваемой АФМ и графика зависимости $T_n(f)$ можно констатировать следующее:

- повышение точности срабатывания АФМ за счет уменьшения распорной силы F_p при минимальном значении коэффициента трения неэффективно вследствие относительно небольшого значения вращающего момента T_{n2} ДФГ, благодаря которому возникает распорная сила;

- максимальное значение предельного вращающего момента T_{n1} ОФГ и, соответственно, полного вращающего момента T_n АФМ можно уменьшить за счет увеличения распорной силы F_p . Одновременно это приведет к увеличению вращающего момента T_{n2} , значение которого в данном случае зависит от распорной силы. Кроме того, увеличение распорной силы при значении коэффициента трения f_k будет означать увеличение распорной силы

при минимальном значении коэффициента трения, что приведет к уменьшению вращающего момента $T_{п1}$, которое нельзя компенсировать увеличением вращающего момента $T_{п2}$ (рис. 3, кривые 1 и 2). Поэтому необходим дополнительный анализ влияния распорной силы на предельный вращающий момент $T_{п}$.

Для увеличения распорной силы удобнее всего изменить значение угла α . Поскольку это приведет к увеличению вращающего момента $T_{п2}$, в том числе и при значении коэффициента трения $f_{\max}$, увеличение угла α должно иметь определенный предел, так как значение вращающего момента $T_{п2}$ может превысить вращающий момент $T_{п}$ при значении коэффициента трения, равном f_k . В этом случае возможно уменьшение точности срабатывания муфты.

Графики, изображенные на рис. 3 (кривые 2 и 4), показывают, что при принятом исходном значении силы $F_{п2}$ пружины 17 имеется ее запас по отношению к распорной силе при небольших значениях коэффициента трения. В соответствии с этим существует возможность ограничения величины предельного вращающего момента $T_{п2}$, в том числе при максимальном значении коэффициента трения за счет уменьшения силы $F_{п2}$.

Примем в качестве скорректированных исходных данных $F_{п2}=80$ Н и $C=1,1$. Данному значению КУ соответствует значение коэффициента трения $f_k=0,33$.

График зависимости $T_{п}(f)$ при указанных исходных данных приведен на рис. 3 (кривая 5). График показывает следующее:

- значение коэффициента трения f_k , при котором функция $T_{п}(f)$ имеет максимум внутри интервала значений $f_{\min} \dots f_{\max}$, смещено в область более высоких значений и в данном случае равно $f_k \approx 0,46$;

- кривая 5 имеет более пологую форму по сравнению с кривой 3, что кос-

венно указывает на более высокую точность срабатывания муфты;

- значение предельного вращающего момента $T_{п}$ АФМ при минимальном коэффициенте трения больше, чем для кривой 3. Это объясняется меньшим значением силы $F_{п2}$ пружины 17, противодействующей силе пружины 12, вследствие чего усилие замыкания пар трения ОФГ выше, чем в первом случае;

- значение предельного вращающего момента $T_{п}$ муфты при максимальном коэффициенте трения больше, чем в предыдущем случае, что объясняется действием на пары трения ДФГ большей распорной силы УУ.

Коэффициент точности муфты в рассматриваемом случае равен $K_t=2,14$. Следовательно, увеличение распорной силы УУ приводит к повышению точности срабатывания АФМ.

Кроме того, увеличивается предельный вращающий момент АФМ при минимальном значении коэффициента трения, т. е. ее номинальный (настроечный) вращающий момент. Данная особенность характерна для АФМ с положительной обратной связью [7], у АФМ с отрицательной обратной связью предельный вращающий момент уменьшается по мере увеличения распорной силы F_p [4].

Анализ кривой 5 показывает неиспользованные резервы увеличения номинального вращающего момента АФМ при минимальном значении коэффициента трения и повышения ее точности срабатывания. Сопоставление графиков 3 и 5 показывает увеличение коэффициента трения f по мере роста распорной силы.

Вращающий момент $T_{п}$ при значении коэффициента трения f_k больше, чем при значении $f_{\max}$. Дальнейший рост распорной силы приведет к увеличению коэффициента трения f_k и одновременно с этим к уменьшению вращающего момента $T_{п}$. При этом вследствие роста распорной силы F_p будет увеличиваться и вращающий момент $T_{п2}$.

Таким образом, при росте распорной силы до некоторого значения кривая зависимости $T_n(f)$ становится монотонно возрастающей. Это отражено на рис. 3 кривой 6, которая построена при $\operatorname{tg} \alpha = 0,35$ и $C = 1,17$.

В последнем случае значение коэффициента точности АФМ определяется по следующей формуле:

$$K_T = \frac{T_n(f_{\max})}{T_n(f_{\min})},$$

где $T_n(f_{\max})$ – предельный вращающий момент муфты, соответствующий максимальному значению коэффициента трения; $T_n(f_{\min})$ – предельный вращающий момент муфты, соответствующий минимальному значению коэффициента трения.

При данных, соответствующих кривой 6, значение коэффициента точности АФМ, вычисленное по приведенной выше формуле, составляет $K_T = 1,92$.

Таким образом, установлено, что, в отличие от модифицированной АФМ второго поколения и АФМ второго поколения с косвенным регулированием, максимальная точность срабатывания рассматриваемой муфты достигается не в том случае, когда кривая нагрузочной характеристики достигает точки максимума внутри интервала значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$, а при монотонно возрастающем характере указанной кривой.

Из последней формулы следует, что значение коэффициента точности рассматриваемой АФМ уменьшается с увеличением вращающего момента $T_n(f_{\min})$. Поскольку, как установлено выше, при небольших значениях коэффициента трения распорная сила УУ невелика и не превышает силу F_{n2} пружины 17, значение вращающего момента T_{n2} зависит только от величины коэффициента трения, а значение вращающего момента T_{n1} – от первоначальной силы натяжения пружины 17.

Для того чтобы увеличить вращающий момент T_{n1} , а также вращающий момент $T_n(f_{\min})$, необходимо уменьшить силу F_{n2} . При этом уменьшится и вращающий

момент T_{n2} , однако, поскольку при выполнении условия $F_p < F_{n2}$ (при небольших значениях коэффициента трения) ОФГ и ДФГ работают в режиме обычной точности срабатывания, т. е. без влияния на их пары трения обратной связи, уменьшение вращающего момента T_{n2} будет компенсировано увеличением вращающего момента T_{n1} , во-первых, вследствие того, что $z > z_1$, во-вторых, вследствие того, что $F_{n1} > F_{n2}$.

Формулу для определения значения полного вращающего момента АФМ находим на основе соотношения (1), т. е. суммированием правых частей выражений (9) и (11):

$$T_n = R_{cp} f \left(zF_{n1} + z_1F_{n2} \frac{1 - zC}{1 - z_1Cf} \right). \quad (13)$$

Функция, представленная формулой (13), монотонно возрастает в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$, если ее первая производная по аргументу f положительная, т. е.

$$(T_n)'_f = zF_{n1} - z_1F_{n2}(zC - 1) \frac{1}{(1 - z_1Cf)^2} > 0.$$

(14)

Неравенство (14) должно выполняться, начиная с определенного значения коэффициента трения, свыше которого в муфте начинает действовать обратная связь, т. е. когда $F_p > F_{n2}$.

Для нахождения упомянутого минимального значения коэффициента трения и выполнения поставленного условия, касающегося соотношения сил F_p и F_{n2} запишем следующее неравенство, с учетом соотношения (10):

$$z_1F_{n2}C \frac{f}{1 - z_1Cf} > F_{n2}.$$

Из составленного неравенства находим ограничение коэффициента трения:

$$f_m > \frac{1}{2z_1C}. \quad (15)$$

Из соотношения (15) следует, что значение коэффициента трения f_m обратно пропорционально значению КУ C и числу пар трения ДФГ. Это объясняется увеличением распорной силы УУ по мере роста

указанных параметров, в результате чего уменьшается пороговое значение коэффициента трения f_m .

Функция (14) убывает по аргументу f , поэтому, принимая максимальное значение коэффициента трения $f_{\max}$ и учитывая соотношение (14) в форме равенства, получаем:

$$F_{n1} = \frac{z_1 F_{n2} (zC - 1)}{z(1 - z_1 C f_{\max})^2}. \quad (16)$$

Формула (16) устанавливает связь между силами натяжения пружин 12 и 17 F_{n1} и F_{n2} , которая необходима для того чтобы при монотонно возрастающей кривой нагрузочной характеристики АФМ в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$ достигалась максимальная точность ее срабатывания.

Наибольшая точность срабатывания АФМ достигается не только в случае выполнения соотношения между значениями сил F_{n1} и F_{n2} согласно формуле (16), но и тогда, когда значение силы F_{n1} превышает значение, вычисленное по указанной формуле. Это следует из неравенства (14).

Уменьшение силы F_{n2} приводит к увеличению номинальной нагрузочной способности муфты и одновременно к уменьшению значения коэффициента трения f_k , при котором начинают действовать отрицательная и положительная обратная связь в муфте.

Точность срабатывания исследуемой АФМ зависит не только от формы нагрузочной характеристики, но и от величины распорной силы УУ, в частности, при максимальном значении коэффициента трения. В АФМ с отрицательной обратной связью увеличение распорной силы приводит к повышению точности срабатывания муфты [4].

В исследуемой АФМ повышение точности срабатывания наблюдается при увеличении распорной силы до некоторого предельного значения (см. рис. 3, кривые 3 и 5). Это объясняется тем, что в случае дальнейшего увеличения распорной силы ее величина при значении коэффициента трения $f_{\max}$ становится больше, чем сила

пружины F_{n1} , и муфта будет передавать вращающий момент только за счет работы ДФГ.

Предельный вращающий момент ДФГ зависит, в частности, от величины распорной силы УУ, которая при максимальном значении коэффициента трения превышает силу F_{n2} .

В этих условиях предельный вращающий момент ДФГ начнет увеличиваться (при увеличении КУ и, соответственно, распорной силы) прогрессивно-нелинейно, приблизительно по закону кубической параболы [10]. Это приводит к резкому снижению точности срабатывания муфты.

При выбранных фиксированных значениях сил F_{n1} и F_{n2} , оптимальных по критерию максимальной точности срабатывания АФМ, величину КУ можно определить, решая неравенство (14). В результате решения получаем следующие области значений КУ C , удовлетворяющие указанному неравенству, в котором постоянный коэффициент при C^2 больше нуля, а дискриминант корней $D > 0$:

$$C \in \left(-\infty; \frac{b - \sqrt{D}}{2a} \right) \cup \left(\frac{b + \sqrt{D}}{2a}; +\infty \right), \quad (17)$$

где

$$b = z z_1 (2 F_{n1} f + F_{n2}); \quad (18)$$

$$a = z z_1^2 F_{n1} f^2; \quad (19)$$

$$D = z^2 z_1^2 F_{n2} \left[4 F_{n1} / F_{n2} f \left(1 - \frac{z_1}{z} f \right) + F_{n2} \right]. \quad (20)$$

В формулах (17) – (20) следует принимать значение коэффициента трения $f_{\max}$.

Поскольку параметр C имеет физический смысл только при положительных значениях, запишем формулу (17) в следующем виде:

$$C \in \left(0; \frac{b - \sqrt{D}}{2a} \right) \cup \left(\frac{b + \sqrt{D}}{2a}; +\infty \right).$$

Кроме того, на значение КУ C должно быть наложено дополнительное ограничение, обусловленное условием самоторможения пар трения ДФГ. Действительно, в рассматриваемой схеме компоновки элементов АФМ распорная сила УУ относится к категории движущих сил для нажимного диска 5 и, согласно известному

положению теоретической механики [8], угол между силой нормального давления, действующей на боковую стенку скошенного гнезда под тело качения, и вектором силы нормального давления, действующей на плоскость фрикционного контакта, должен быть больше угла трения.

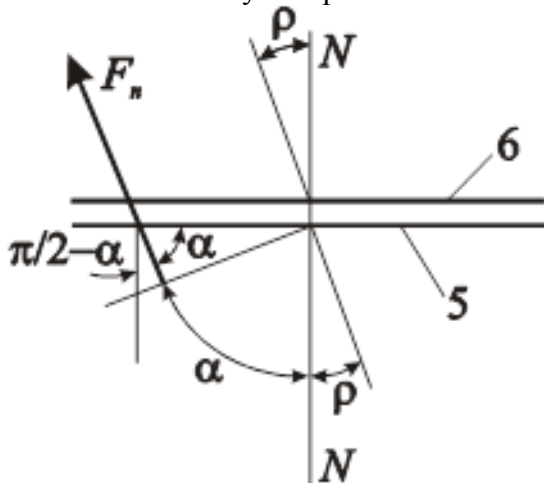


Рисунок 4. Схема фрикционного контакта ДФГ

Рассмотрим схему фрикционного контакта ДФГ, иллюстрирующую изложенное выше и изображенную на рис. 4. Вектор силы нормального давления F_n , действующей на боковую стенку гнезда нажимного диска 5, отклонен от нормали $N - N$, проведенной к плоскости фрикционного контакта 5–6 (нумерация элементов, изображенных на рис. 4, соответствует нумерации элементов на рис. 2) на угол, равный $\pi/2 - \alpha$.

Согласно схеме, условие отсутствия самоторможения пары трения 5–6 ДФГ запишем в следующем виде:

$$\frac{\pi}{2} - \alpha > \rho, \quad (21)$$

где ρ – угол трения; α – см. выше.

На основании условия (21) запишем:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) > \operatorname{tg} \rho. \quad (22)$$

Поскольку $\operatorname{tg} \rho = f$, запишем соотношение (22) в следующем виде:

$$\operatorname{ctg} \alpha > f_{\max}. \quad (23)$$

В соотношении (23) принято максимальное значение коэффициента трения,

поскольку при значениях $f < f_{\max}$ поставленное условие выполняется.

Запишем соотношение (23) в виде

$$\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} > f_{\max},$$

или в виде

$$\operatorname{tg} \alpha < \frac{1}{f_{\max}}. \quad (24)$$

Учитывая полученную выше формулу для определения значения КУ и соотношение (24), находим, принимая во внимание знак неравенства:

$$C < \frac{R_{\text{ср}}}{rf_{\max}}. \quad (25)$$

Неравенство (25) устанавливает ограничение значения КУ по условию самоторможения пар трения ДФГ муфты. Нетрудно заметить, что принятые выше исходные данные при построении графиков на рис. 3 удовлетворяют как условию (24), ограничивающему значение $\operatorname{tg} \alpha$, так и условию (25), согласно которому ограничивается значение КУ C .

Обсуждение и результаты. На основе выдвинутой научной предпосылки теоретического обоснования посредством положительно-отрицательной обратной связи параллельного действия в виде факта уменьшения момента сил трения разработана идея реализации принципа косвенного регулирования в АФМ с положительно-отрицательной обратной связью, которая заключается в генерации распорной силы УУ, действующей от выходного сигнала ДФГ, и управления с ее помощью усилиями прижатия друг к другу пар трения в ОФГ и ДФГ в режиме параллельного действия.

Выявленные режимы работы АФМ и формы ее нагрузочной характеристики позволили определить оптимальные значения параметров УУ отрицательно-положительной обратной связи, при которых муфта обладает наилучшими эксплуатационными характеристиками.

Научные и практические результаты исследования, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при расчетах и проектировании АФМ рассмотренного типа для оптимизации их параметров,

обеспечивающих высокую точность срабатывания муфты.

Выводы

1. Основной недостаток АФМ с отрицательно-нулевой (базовый вариант) и отрицательно-нулевой обратной связью (с косвенным регулированием), заключающийся в ограниченной точности срабатывания, обусловлен относительно невысоким значением распорной силы УУ, соответствующим текущему значению коэффициента трения, а также значительным рассогласованием закономерностей изменения распорных сил упомянутых муфт и «идеальной» АФМ.

2. Научной предпосылкой теоретического обоснования принципа косвенного регулирования на основе положительно-отрицательной обратной связи параллельного действия является факт уменьшения момента сил трения АФМ и, соответственно, смещение значения коэффициента трения, соответствующего максимальному вращающему моменту АФМ второго поколения, в область меньших значений при увеличении входного сигнала (распорной силы) УУ.

3. Идея реализации принципа косвенного регулирования в АФМ с положительно-отрицательной обратной связью заключается в генерации распорной силы УУ, действующей от выходного сигнала ДФГ, и управления с ее помощью усилиями прижатия друг к другу пар трения в ОФГ и ДФГ в режиме параллельного действия.

4. Для более эффективного регулирования процессов, протекающих в АФМ, действие распорной силы на пары трения ОФГ должно быть слабым при небольших значениях коэффициента трения.

5. Для достижения наибольшей точности срабатывания АФМ усилие замыкания пар трения ДФГ с помощью силового упругого элемента должно превышать распорную силу, создаваемую УУ при минимальном значении коэффициента трения. В данном случае в определенном интервале небольших значений коэффициента трения АФМ будет работать в режиме нулевой обратной связи.

6. В режиме действия положительной

обратной связи предельный вращающий момент ДФГ изменяется приблизительно по закону кубической параболы в функции коэффициента трения.

7. Результатом теоретического обоснования принципа косвенного регулирования в АФМ на основе положительно-отрицательной обратной связи, действующей в режиме параллельного регулирования, явилась разработка структурно-функциональной и принципиальной схем АФМ, реализующих указанный принцип.

8. На основе синтезированных структурно-функциональной и принципиальной схем АФМ разработана математическая модель, позволившая исследовать зависимость предельного вращающего момента муфты от коэффициента трения и КУ обратной связи.

9. Особенностью, синтезированной АФМ является линейная зависимость величины предельного вращающего момента муфты не только в определенном интервале минимальных значений коэффициента трения, но и в определенном диапазоне внешних нагрузок, величина которых меньше номинального вращающего момента муфты.

10. Для увеличения предельного вращающего момента синтезированной АФМ число пар трения ОФГ должно превышать число пар трения ДФГ.

11. Характер зависимости распорной силы УУ АФМ определяется законом изменения величины вращающего момента ДФГ в функции коэффициента трения.

12. Предельный вращающий момент, развиваемый ОФГ, может обращаться в ноль внутри интервала изменения коэффициента трения или на его верхней границе. Значение коэффициента трения, при котором вращающий момент ОФГ равен нулю, зависит от величины коэффициента усиления УУ.

13. Предельный вращающий момент АФМ может принимать максимальное значение внутри интервала изменения коэффициента трения или на его верхней границе. Значение коэффициента трения, принадлежащее упомянутому интервалу и соответствующее переходу графика функции пре-

дельного вращающего момента ДФГ на нелинейный участок, соответствует также максимуму нагрузочной характеристики муфты.

14. Наиболее высокая точность срабатывания АФМ достигается в том случае, когда максимальное значение предельного вращающего момента муфты, которое соответствует значению коэффициента трения, находящемуся внутри интервала значений $f_{\min} \dots f_{\max}$, равно предельному вращающему моменту ДФГ при максимальном значении коэффициента трения. В этом случае распорная сила УУ обратной связи должна быть равна усилию замыкания нажимного устройства ОФГ, а предельный вращающий момент последней – нулю.

15. В отличие от модифицированной АФМ второго поколения с увеличением КУ обратной связи значение коэффициента трения, при котором предельный вращающий момент исследуемой муфты максимален, смещается в область максимума.

16. С увеличением КУ обратной связи до определенного значения повышается точность срабатывания АФМ. Упомянутое значение КУ соответствует равенству нулю предельного вращающего момента ОФГ при монотонно возрастающей нагрузочной характеристике АФМ в интервале изменения величины коэффициента трения. При указанной форме нагрузочной характеристики максимальная точность срабатывания АФМ достигается в том случае, когда значение КУ достигает упомянутого предельного значения.

17. При монотонной форме нагрузочной характеристики АФМ увеличение КУ обратной связи приводит к увеличению предельного вращающего момента муфты при максимальном и минимальном значениях коэффициента трения.

18. Найдена функциональная взаимосвязь между первоначальными усилиями замыкания пар трения ОФГ и ДФГ, при которой достигается наибольшая точность срабатывания АФМ.

19. Установлено пороговое значение коэффициента трения, от которого начинает действовать обратная связь в муфте. Пороговое значение зависит от величины КУ.

20. Найдено ограничение максимального значения КУ обратной связи по условию предотвращения самоторможения пар трения ОФГ.

Библиографический список

1. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Исследование эксплуатационных характеристик адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 4. – С. 21–26.
2. Шишкарёв М.П. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел 2-го поколения // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVIII Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 «Компьютерная поддержка производственных процессов» / Под общ. ред. В.С. Балакирева – Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 72–76.
3. Шишкарёв М.П. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVIII Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 «Компьютерная поддержка производственных процессов» / Под общ. ред. В.С. Балакирева – Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 68–72.
4. Шишкарёв М.П. Теоретические основы применения комбинированной обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 7. – С. 16–19.
5. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Анализ точности срабатывания вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 3. – С. 36–42.
6. Шишкарёв М.П. Особенности процесса срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Вестн. машиностроения. – 2004. – № 4. – С. 3–7.
7. Шишкарёв М.П. Математические модели высокой надежности адаптивных фрикционных муфт // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVI Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5.

- Секция 5 «Компьютерная поддержка производственных процессов» / Под общ. ред. В.С. Балакирева / РГАСХМ ГОУ, Ростов н/Д, 2003. – С. 231–234.
8. Шишкарёв М.П. Математическая модель устойчивости движения привода с адаптивной фрикционной муфтой // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XV Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 8. Секция 8 «Компьютерная поддержка технологических процессов и производственных систем» / Под общ. ред. В.С. Балакирева. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – С. 70–75.
 9. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием // Вестн. ДГТУ. – 2014. – Т. 14. № 1 (76). – С. 200–203.
 10. Шишкарёв М.П., Угленко А.Ю. Анализ эксплуатационных характеристик вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 8. – С. 25–29.
 11. Шишкарёв М.П. Повышение надёжности адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 4. – С. 6–9.
 12. Шишкарёв М.П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт / Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 13–15.
 13. Шишкарёв М.П. Уточнение характеристики обратной связи адаптивных фрикционных муфт // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 11. – С. 12–13.
 14. Шишкарёв М.П. Исследование базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Материалы 8-й междунар. науч.-практ. конф. «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» 3–6 марта 2015 г., Ростов н/Д, 2015. – С. 162–167.
 15. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 9. – С. 42–45.

Information about the paper in English

M.P. Shishkarev
Don State Technical University (DSTU)
Rostov-on-Don, Russian Federation
E-mail: shishkarevm@mail.ru
Received 28.10.2018

SYNTHESIS OF A SELF-ADJUSTING COMBINATION FEEDBACK
FRICTION CLUTCH OF PARALLEL ACTION

Abstract

On the basis of synthesized structural-functional and principal diagrams of the self-adjusting friction clutch with positive-negative feedback and parallel automatic adjustment, a mathematical model was developed that helped understand how the breakdown torque is governed by the friction coefficient of the clutch and the feedback gain factor.

Keywords: Self-adjusting friction clutch, positive-negative, friction coefficient, feedback, gain factor, precision action.



УДК 004.94

Е.С. Решетникова, Е.А. Свистунова
В.О. Широков, Ю.А. Гудаева
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: elenresh74@gmail.com
Дата поступления 08.06.2019

ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОМПЕТЕНЦИИ ИНЖЕНЕРНЫЙ ДИЗАЙН CAD (САПР) ПО СТАНДАРТАМ WORLDSKILLS В МГТУ ИМ. Г.И. НОСОВА

Аннотация

В статье дано описание, цель и миссия международного некоммерческого движения WorldSkills. Отмечена значимость проведения чемпионатов для повышения уровня профессионального образования в высших учебных заведениях. Показана история участия студентов и преподавателей кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования в чемпионатах по стандартам WorldSkills в компетенции Инженерный дизайн CAD.

Ключевые слова: WorldSkills, чемпионат, система автоматизированного проектирования, конкурсное задание, Инженерный дизайн CAD.

Введение

WorldSkills – это международное некоммерческое движение, целью которого является повышение престижа рабочих профессий и развитие профессионального образования путем гармонизации лучших практик и профессиональных стандартов во всем мире посредством организации и проведения конкурсов профессионального мастерства, как в отдельной стране, так и во всем мире в целом.

Миссия - развитие профессиональных компетенций, повышение престижа высококвалифицированных кадров, демонстрация важности компетенций для экономического роста и личного успеха [1].

Основная часть

WorldSkills – центр совершенствования и развития навыков мастерства. Благодаря международному сотрудничеству и развитию связей между производствами, правительствами, организациями и институтами WorldSkills показывает преимущества и необходимость в квалифицированных специалистах через проведение соревнований, организацию совместных проектов и обмена опытом. Движение подчеркивает важность профессиональной подго-

товки и обучения для молодежи, промышленности и общества, помогает молодым специалистам стать лучшими в выбранной ими профессии.

WorldSkills объединяет молодежь, производства и педагогов, чтобы научить молодых людей профессиональному мастерству и показать им, как стать лучшими в выбранной ими специальности. От традиционных ремесел до многопрофильных профессий в области промышленности и сферы услуг при поддержке партнеров, производств, правительства, волонтеров и учебных заведений WorldSkills оказывает прямое влияние на рост профессионального мастерства во всем мире. На сегодняшний день это известное во всем мире и крупнейшее соревнование, в котором задействованы молодые квалифицированные рабочие, студенты университетов и колледжей в качестве участников и известные профессионалы, специалисты, мастера производственного обучения и наставники – в качестве экспертов, оценивающих выполнение задания [1].

Чемпионат – это многогранное событие, где встречаются руководители государственных органов и образовательных учреждений, представители промышленности и общественных организаций, место,

где обсуждаются самые важные и актуальные вопросы, связанные с профессиональным мастерством. Чемпионаты WorldSkills проходят раз в два года в различных стра-

нах и являются важнейшим событием в области повышения профессиональной подготовки и совершенствования мастерства, всесторонне отражающим все направления от промышленности до сферы услуг.



Рисунок 1. Масштаб движения WorldSkills в 2019г

Конкурсантами являются победители национальных чемпионатов профессионального мастерства стран – членов WorldSkills. Они демонстрируют как уровень своей технической подготовки, так и индивидуальные и коллективные качества, решая поставленные перед ними задачи, которые они изучают и/или выполняют на своем рабочем месте. Их успех или провал говорит не только об их личных профессиональных качествах, но и об уровне профессиональной подготовки в той стране, которую они представляют, и общем уровне качества услуг на родине участников.

В чемпионатах WorldSkills компетенции объединены в 6 тематических блоков:

- строительная сфера;
- IT- технологии;
- промышленное производство;
- обслуживание гражданского транспорта;
- сфера услуг;
- творчество и дизайн.

История международного движения WorldSkills

Движение WorldSkills International (WSI) зародилось в послевоенные годы в Испании (1947 год), когда миру катастрофически не хватало квалифицированных рабочих рук. Первые чемпионаты проводились с целью популяризации рабочих профессий и повышения их престижа. Сегодня это эффективный инструмент подготовки кадров в соответствии с мировыми стандартами и потребностями новых высокотехнологичных производств.

Под эгидой WorldSkills проводятся региональные, национальные и мировые чемпионаты, континентальные первенства. За полувековую историю международного движения к WorldSkills присоединились 79 стран. Россия это сделала в 2012 году. За шесть лет были проведены порядка 500 региональных, корпоративных, вузовских и национальных чемпионатов. В них приняли участие более 100 тысяч участников. Общее число зрителей приблизилось к 1,6 млн человек [1].



Рисунок 2. История WorldSkills Россия

Межвузовский чемпионат по стандартам WorldSkills – конкурс профессионального мастерства между студентами высших учебных заведений. Победители вузовских чемпионатов встречаются в национальном финале.

С 3 по 7 июня 2019 на площадке Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова в третий раз прошел вузовский отборочный чемпионат «Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» по стандартам WorldSkills [2]. Соревнование конкурсантов проходили в группах по компетенциям. На протяжении конкурсных дней участники выполняли ряд заданий, результат которых оценивала команда экспертов.

В третьем вузовском отборочном чемпионате «Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» по стандартам WorldSkills прошли соревнования по компетенциям:

- Инженерный дизайн CAD (САПР);
- Инженерный дизайн CAD (САПР)

Юниоры;

- Веб-дизайн и разработка;
- Программные решения для бизнеса;
- Предпринимательство;
- Преподавание в основной и средней школе;

- Экспедирование грузов.

В компетенции «Инженерный дизайн CAD» в чемпионате ежегодно принимают участие студенты кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования, обучающиеся по образовательной программе высшего образования – программе специалитета 15.05.01 Проектирование технологических машин и комплексов (специализация Проектирование металлургических машин и комплексов). Подготовкой участников и работой на чемпионате в качестве экспертов-компатриотов ежегодно занимаются преподаватели кафедры.

Термином «Инженерный дизайн CAD» обозначается процесс использования систем автоматизированного проектирования (САПР) при подготовке электронных моделей, чертежей и файлов, содержащих всю информацию, необходимую для изготовления и документирования деталей и сборочных единиц для решения механических инженерных задач, с которыми сталкиваются работники отрасли. Решения должны соответствовать стандартам промышленности и актуальной версии стандартов ЕСКД (либо стандарта ISO) [3].



Рисунок 3. Студенты кафедры на третьем вузовском отборочном чемпионате «Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» по стандартам WorldSkills (компетенция Инженерный дизайн CAD)

Автоматизированное проектирование – это использование компьютерных систем для разработки, усовершенствования, анализа или оптимизации механических конструкций. Применение программного обеспечения увеличивает возможности проектировщика, повышает качество конструкции, улучшает связь через обмен документацией и дает возможность создать базу

данных для производства. Результатом автоматизированного проектирования являются электронные файлы, которые можно распечатать и использовать при изготовлении в других процессах. Чертежи конструкций и изображения с помощью соответствующих обозначений должны передавать такую информацию как материалы, технологические процессы, допуски и размеры. С помощью CAD систем строятся кривые и

составляются двухмерные (2D) изображения, а также трёхмерные (3D) кривые, поверхности и объёмные фигуры. С помощью САПР можно реализовать специальные эффекты в виде анимации, например, с целью рекламы или для использования в технических инструкциях.

САПР является важным промышленным инструментом и важным средством достижения высокого качества проекта, используется в самых разных областях, таких как автомобилестроение, судостроение, авиакосмическая отрасль и машиностроение. Процесс и результаты автоматизированного проектирования очень важны для нахождения правильного решения при проектировании и изготовлении. Программное обеспечение помогает при нахождении идей, визуализации концепций, предоставляя близкие к реальности снимки и фильмы, имитируя поведение будущих механизмов в реальных условиях.

Содержанием конкурсного задания [4] является машиностроительное проектирование. Участники соревнований получают текстовое описание задания, чертежи деталей и сборок, файлы электронных мо-

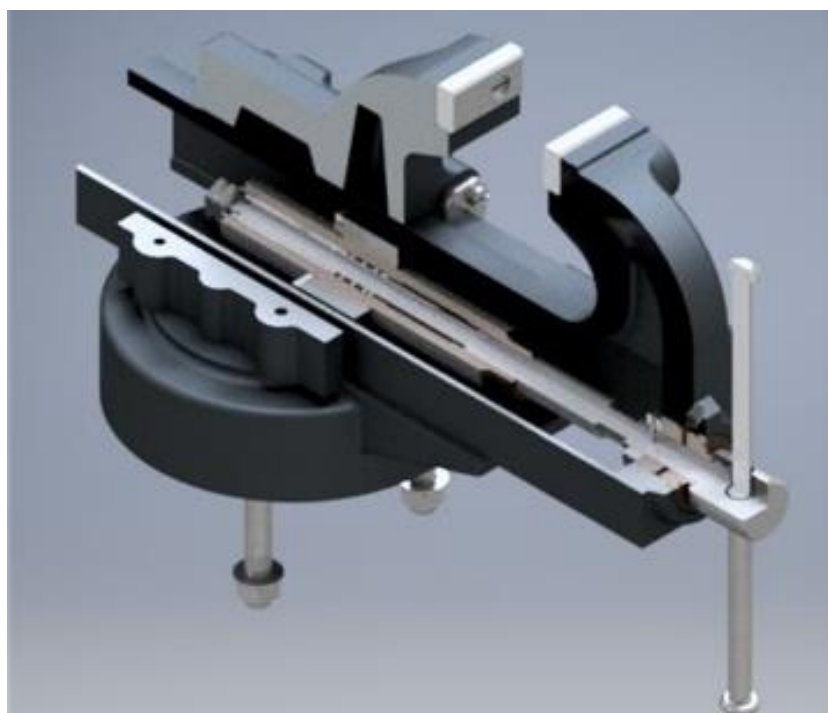
делей деталей и сборок. Конкурсное задание имеет несколько модулей, выполняемых последовательно. Каждый выполненный модуль оценивается отдельно. Выбор конкурсных модулей определяют сертифицированные эксперты перед началом чемпионатных мероприятий. Выполнение задания включает в себя построение 3D-моделей деталей, подборок и сборок в соответствии с информацией, приведенной на чертежах и в текстовом описании, создании чертежей, создании фотореалистичной визуализации, схем сборки-разборки указанных частей конструкций, создании анимационных видеороликов, демонстрирующих работу механизмов, разработку 3D-модели для печати на 3D-принтере. Окончательные аспекты критериев оценки уточняются членами жюри. Оценка производится в соответствии с утвержденной экспертами схемой оценки. Конкурсное задание должно выполняться помодульно. Оценка работ также происходит за каждый модуль. Сохранение результатов работы участников согласно условиям задания и требований, изложенных в Техническом описании.



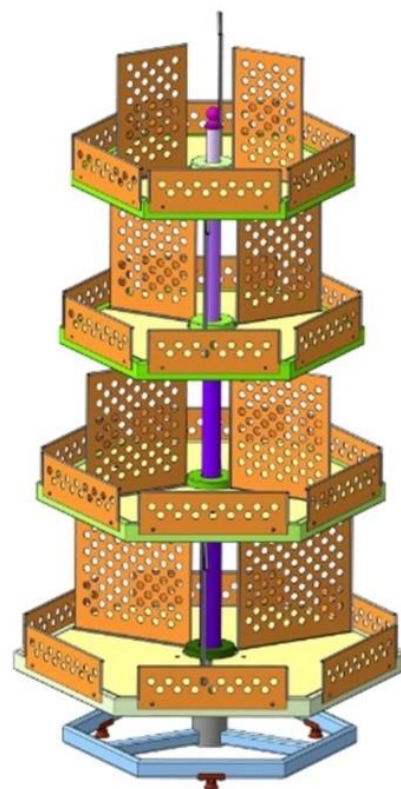
Рисунок 4. Пример конкурсного задания модуля Б (компетенция Инженерный дизайн CAD)

В третьем вузовском чемпионате «Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова» по стандартам WorldSkills впервые прошли соревнования в компетенции Инженерный дизайн CAD Юниоры. Пятеро участников из средних образовательных учреждений г. Магнитогорска в течение двух конкурсных дней выполняли задания в современных системах автоматизированного проектирования: Компас 3D и Autodesk Inventor.

В первый день участникам для выполнения был представлен модуль А Механические сборки и детальные чертежи для производства (рис. 5, а). Основное задание заключалось в моделировании деталей и сборке слесарных тисов с ускоренным приводом, так же оценивались навыки участников в создании фотореалистичной визуализации и анимации работы устройства.



а



б

Рисунок 5. Конкурсное задание Инженерный дизайн CAD Юниоры:
а) модуль А - Механические сборки и детальные чертежи для производства;
б) модуль В - Машиностроительное производство

Во второй день участникам предстояла работа с металлоконструкциями, листовыми материалами и параметрическими деталями – модуль В - Машиностроительное производство (рисунок 5, б). Как и в первый день, у участников было 4 часа, чтобы справиться с поставленной задачей. Помимо создания деталей и дальнейшей их сборки, необходимо было сделать фотореалистичную визуализацию и анимацию с целью демонстрации готового изделия.

Студенты кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и

оборудования, обучающиеся по образовательной программе специалитета 15.05.01, занимались подготовкой школьников и работали экспертами-компатриотами на чемпионате. Двое из них – Нургалин Ф.И. и Широков В.О. стали победителями первого и второго отборочных вузовских чемпионатов соответственно, принимали участие в национальных финалах в г. Москва и вошли в десятку лучших в компетенции Инженерный дизайн CAD по РФ. Сертифицированный эксперт из г. Челябинск отметил высокий уровень подготовки и профессионализм студентов.



Рисунок 6. Участники и эксперты компетенции Инженерный дизайн САД Юниоры

Высокие результаты студентов специальности 15.05.01 в данной компетенции достигаются за счет использования при подготовке выпускников комплексного подхода в преподавании дисциплин, с использованием современных методов и средств проектирования, расчета, математического, физического и компьютерного моделирования. САПР: КОМПАС-3D, AutoCAD, Autodesk Inventor, APM WinMachine осваиваются студентами на протяжении всего учебного процесса в вузе в рамках различных дисциплин и применяются при выполнении курсовых работ и дипломного проекта. С помощью разработанных на кафедре методик преподавания, учебных пособий и материалов [5-10] обеспечена сквозная интеграция современных САПР в образовательный процесс.

Перспективы развития компетенции Инженерный дизайн САД на кафедре:

- повышение уровня владения КОМПАС-3D и Autodesk Inventor;

- привлечение студентов к подготовке школьников с целью передачи опыта участия в чемпионатах;
- создание центра подготовки;
- повышение квалификации преподавателей кафедры;
- подготовка и участие в национальном финале в ноябре 2019г. в г. Москва.

Заключение

WorldSkills – международная организация, продвигающая профессиональное, техническое и ориентированное на сферу услуг образование и обучение. Движение повышает стандарты профессиональной подготовки в странах – членах WorldSkills, работая с молодежью, педагогами, правительствами и производствами, создавая трудовые ресурсы и рабочие таланты сегодня, чтобы помочь в трудоустройстве в будущем.

МГТУ им. Носова ежегодно расширяет перечень компетенций на отборочном вузовском чемпионате, тем самым вовлекая

студентов в движение WorldSkills и повышая уровень профессиональной подготовки выпускников. Количество участников в компетенции Инженерный дизайн CAD ежегодно увеличивается, растет интерес к чемпионату и профессионализм студентов кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования. Победителям в компетенциях Инженерный дизайн CAD - Гудаевой Ю.А. и Инженерный дизайн CAD Юниоры - Решетниковой А.Л. предстоит показать свои навыки владения САПР и представить университет на национальном финале в ноябре 2019г. в г. Москва.

Библиографический список

1. <https://worldskills.ru>
2. <https://www.magtu.ru/worldskills-2019/o-worldskills.html>
3. Техническое описание компетенции «Инженерный дизайн CAD» <https://worldskills.ru>
4. Конкурсное задание компетенции «Инженерный дизайн CAD» <https://worldskills.ru>
5. Решетникова Е.С. Реализация методики оптимального проектирования ленточного конвейера в САПР Autodesk Inventor // В книге: Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции. 2019. С. 199.
6. Усатая Т.В., Дерябина Л.В., Решетникова Е.С. Современные подходы к проектированию изделий в процессе обучения студентов компьютерной графике // Геометрия и графика. 2019. Т.7. № 1. С. 74-82.
7. Решетникова Е.С., Усатая Т.В. Технологии САПР для оптимизации процесса обучения компьютерной графике в техническом университете // Механическое оборудование металлургических заводов. 2014. № 3. С. 133-138.
8. Решетникова Е.С., Дерябина Л.В., Усатая Т.В., Свистунова Е.А. Компьютерная графика в машиностроении // Межотраслевой институт Наука и образование. 2015. № 6. С. 60-63.
9. Свистунова Е.А. Современные САПР в процессе изучения инженерной и компьютерной графики в профессиональной подготовке студентов технического университета // Механическое оборудование металлургических заводов. 2014. № 3. С. 190-196
10. Решетникова Е.С., Усатая Т.В., Усатый Д.Ю. Компьютерная графика в дизайне и проектировании // Архитектура. Строительство. Образование. 2015. № 2 (6). С. 194-201.

Information about the paper in English

E.S. Reshetnikova, E.A. Svistunova

V.O. Shirokov, Yu.A. Gudaeva

Nosov Magnitogorsk State Technical University

Magnitogorsk, Russian Federation

E-mail: elenresh74@gmail.com

Received 08.06.2019

HISTORY AND PROSPECTS OF THE WORLDSKILLS ENGINEER'S CAD DESIGN AT NMSTU

Abstract

This paper describes the international non-profit movement WorldSkills, its goal and mission; highlights the importance of holding the WorldSkills championships to improve vocational training provided by universities; and tells about the participation of the students and staff of the Department of Design and Operation of Metallurgical Machinery in WorldSkills championships in the Engineer's CAD Design competence area.

Keywords: WorldSkills, championship, computer-aided design system, task, Engineer's CAD Design.

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 подписуточной 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 сталеплавыльщиков

Научно-технический журнал МОМЗ

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