

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ РАСТЯЖЕНИЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТОКОВЕДУЩИХ ЖИЛ

**Иванова Вера Павловна
Цыпкина Виктория Вячеславовна
Пирназарова Сарбиназ Сарсенбаевна
Аминов Руслан Дмитриевич**

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных характеристик токоведущих жил кабельной продукции на основе совершенствования процесса волочения путем совмещения фильерного и бесфильерного деформирования с созданием дополнительного растягивающего усилия. Показано, что традиционная технология волочения сопровождается значительными контактными напряжениями, трением, тепловыделением и формированием остаточных напряжений, что приводит к снижению однородности деформации и ухудшению геометрической стабильности проволоки. Обоснована необходимость разработки информационной модели технологического процесса, позволяющей учитывать взаимосвязь оборудования, инструмента и свойств материала. Предложена структуризация физических эффектов процесса волочения на общие и частные, а также их классификация по статическим и динамическим параметрам. Показано, что формирование дополнительного растягивающего усилия способствует перераспределению деформационных нагрузок, снижению износа волочильного инструмента и повышению стабильности диаметра проволоки. Установлено, что системный подход к моделированию процесса позволяет повысить точность прогнозирования качества продукции и оценить эффективность технологических решений. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и модернизации волочильного оборудования кабельной промышленности.

Ключевые слова: волочение, токоведущая жила, информационное моделирование, пластическая деформация, фильера, дополнительное растяжение, остаточные напряжения, кабельная продукция, качество проволоки, технологический процесс.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач современного кабельного производства является обеспечение высоких эксплуатационных характеристик токоведущих жил при одновременном снижении материальных и энергетических затрат на их изготовление. Качество токоведущей жилы в значительной степени определяется стабильностью ее геометрических параметров, состоянием поверхности, структурой металла и уровнем остаточных напряжений, формирующихся в процессе обработки давлением. От

указанных факторов зависят электрическое сопротивление проводника, его механическая прочность, гибкость, надежность при монтаже и долговечность в процессе эксплуатации.

Основной технологической операцией производства проволоки для токоведущих жил является волочение, обеспечивающее получение требуемого диаметра и качества поверхности проводника. Вместе с тем традиционная технология фильерного волочения сопровождается значительными контактными напряжениями в очаге деформации, интенсивным трением между металлом и инструментом, повышенным тепловыделением и возникновением остаточных напряжений в материале. Указанные явления могут приводить к неравномерности деформации по сечению проволоки, повышению степени наклепа, ухудшению пластических свойств и отклонению геометрических параметров готового изделия от нормативных значений.

Особое значение данные факторы приобретают при производстве токоведущих жил кабельной продукции, поскольку даже незначительные отклонения диаметра, овальность проволоки или локальные дефекты поверхности способны привести к изменению электрических характеристик проводника, увеличению потерь электроэнергии и снижению надежности кабельных изделий в процессе эксплуатации.

Одним из перспективных направлений совершенствования технологии является совмещение процессов фильерного и бесфильерного волочения, предусматривающее создание дополнительного растягивающего усилия на выходе проволоки из чистой фильеры. Такой подход позволяет перераспределить деформационные нагрузки в очаге деформации, уменьшить контактное давление на рабочую поверхность инструмента, стабилизировать процесс формообразования и повысить точность получения конечного диаметра проволоки. В результате создаются предпосылки для улучшения эксплуатационных свойств токоведущей жилы за счет повышения однородности деформации материала, уменьшения остаточных напряжений и обеспечения стабильности электрических и механических характеристик проводника.

Исследование влияния предлагаемых технологических изменений на параметры процесса волочения требует применения методов моделирования, позволяющих учитывать взаимосвязь между характеристиками оборудования, режимами деформации и свойствами обрабатываемого материала. В связи с этим актуальной задачей является разработка информационной модели ресурсо-сберегающего способа волочения, обеспечивающей возможность анализа физических процессов, прогнозирования качества готовой продукции и оценки эффективности внедрения новых технических решений.

Целью работы является разработка информационной модели усовершенствованной технологии волочения, основанной на совмещении фильерного и бесфильерного способов деформирования, и исследование ее влияния на формирование геометрических параметров и эксплуатационных свойств токоведущих жил кабельной продукции.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ современных технологий производства кабельно-проводниковой продукции показывает, что повышение качества токоведущих жил является одной из приоритетных задач кабельной промышленности. Эксплуатационные свойства готового кабельного изделия в значительной степени определяются характеристиками токоведущей жилы, к которым относятся стабильность геометрических размеров, качество поверхности проволоки, электрическая проводимость, механическая прочность, пластичность и однородность структуры материала.

Существующие технические решения в области совершенствования процесса волочения направлены преимущественно на снижение энергозатрат и повышение производительности оборудования. Для достижения указанных целей применяются высокоизносостойкие материалы волочильного инструмента, специальные смазочные композиции, многократные схемы волочения, оптимизированные режимы деформации и автоматизированные системы управления технологическим процессом. Наряду с этим ведутся исследования по снижению сил трения в очаге деформации и уменьшению остаточных напряжений в материале проволоки.

Несмотря на достигнутые результаты, анализ известных технических решений показывает, что большинство из них ориентировано на совершенствование отдельных элементов технологической системы без учета комплексного влияния параметров процесса на формирование эксплуатационных свойств токоведущей жилы. В частности, недостаточно изученным остается вопрос перераспределения деформационных нагрузок в процессе волочения с целью обеспечения более равномерного течения металла, снижения контактных напряжений на границе «проволока–инструмент» и повышения стабильности геометрических параметров готового изделия.

Одним из перспективных направлений развития технологии является совмещение процессов фильерного и бесфильтерного волочения, основанное на создании дополнительного растягивающего усилия после прохождения проволокой рабочей зоны фильеры. Предполагается, что применение такого подхода позволит уменьшить нагрузку на волочильный инструмент, снизить влияние сил трения, обеспечить более равномерное распределение деформации по сечению проволоки и повысить стабильность выходного диаметра. В конечном итоге это должно способствовать улучшению качественных характеристик токоведущей жилы и повышению надежности готовой кабельной продукции.

Однако внедрение подобных технических решений требует предварительной оценки их эффективности с учетом взаимосвязи между параметрами оборудования, характеристиками инструмента, свойствами обрабатываемого материала и показателями качества готового изделия. Проведение полномасштабных экспериментальных исследований связано со значительными материальными затратами и риском возникновения нештатных режимов работы оборудования.

В связи с этим возникает необходимость разработки информационной модели усовершенствованной технологии волочения, позволяющей на основе анализа физических эффектов и технологических параметров исследовать влияние дополнительного растягивающего усилия на процесс формирования токоведущей жилы.

Таким образом, целью исследования является разработка информационной модели ресурсо-сберегающего способа волочения, обеспечивающей оценку влияния совмещенного фильерного и бесфильерного деформирования на геометрические параметры проволоки, состояние волочильного инструмента и эксплуатационные характеристики токоведущих жил кабельной продукции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ существующих технологий и технических решений, направленных на повышение качества токоведущих жил;
- выявить основные физические факторы, влияющие на формирование эксплуатационных свойств проволоки в процессе волочения;
- разработать структуру информационной модели технологического процесса с учетом взаимодействия системы «оборудование – инструмент – материал»;
- установить взаимосвязь между технологическими параметрами процесса и показателями качества готовой продукции;
- оценить эффективность применения дополнительного растягивающего усилия с точки зрения улучшения геометрических, механических и эксплуатационных характеристик токоведущей жилы.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЛОЧЕНИЯ И ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ТОКОВЕДУЩИХ ЖИЛ

Процесс волочения является одной из основных технологических операций производства кабельно-проводниковой продукции и предназначен для получения проволоки требуемого диаметра с заданными геометрическими, механическими и электрическими характеристиками. В зависимости от условий деформирования, конструктивного исполнения оборудования и способа формирования конечного размера различают несколько технологий волочения, каждая из которых обладает определенными преимуществами и ограничениями.

Наиболее распространенным способом производства токоведущих жил в настоящее время является холодное фильерное волочение, основанное на пластическом деформировании металла путем его протягивания через калибрующее отверстие волочильного инструмента — фильеры. Данный способ обеспечивает высокую точность размеров, стабильность диаметра по длине изделия и низкую шероховатость поверхности, что является необходимым условием получения качественной кабельной продукции.

Качество готовой проволоки определяется не только параметрами технологического процесса, но и характеристиками исходного материала. К числу

основных требований, предъявляемых к заготовке, относятся однородность химического состава, равномерность микроструктуры, стабильность механических и физических свойств по объему материала, а также отсутствие неметаллических включений и структурных дефектов. Нарушение указанных требований (таблица-1) приводит к неравномерности течения металла в очаге деформации, возникновению локальных перенапряжений и ухудшению качества готового изделия.

Влияние технологических факторов процесса волочения на качество токоведущей жилы

Таблица 1

Технологический фактор	Механизм воздействия	Влияние на качество проволоки	Влияние на эксплуатационные свойства жилы
Степень деформации	Изменение структуры металла и накопление дислокаций	Упрочнение материала, уменьшение пластичности	Повышение прочности, снижение гибкости
Скорость волочения	Увеличение интенсивности деформации и тепловыделения	Изменение структуры поверхностного слоя	Возможное ухудшение электропроводности
Сила волочения	Формирование напряженно-деформированного состояния	Возникновение остаточных напряжений	Снижение долговечности проводника
Коэффициент трения	Рост контактных напряжений в очаге деформации	Ухудшение качества поверхности	Увеличение вероятности локальных дефектов
Температура в очаге деформации	Изменение физико-механических свойств материала	Неравномерность свойств по сечению проволоки	Изменение электрических характеристик
Износ фильеры	Изменение геометрии рабочего канала	Отклонение диаметра и овальность проволоки	Снижение стабильности параметров жилы

Технологический фактор	Механизм воздействия	Влияние на качество проволоки	Влияние на эксплуатационные свойства жилы
Качество смазки	Снижение трения и теплообразования	Улучшение состояния поверхности	Повышение надежности кабельного изделия
Однородность исходного материала	Равномерность протекания деформации	Стабильность геометрических параметров	Стабильность электрических характеристик

В процессе волочения под действием приложенной силы происходит сложное напряженно-деформированное состояние металла (рис.1), сопровождающееся развитием упругих и пластических деформаций. Пластическая деформация обеспечивает изменение геометрических размеров заготовки за счет уменьшения площади поперечного сечения и увеличения длины изделия. Одновременно в материале формируется дислокационная структура, приводящая к эффекту деформационного упрочнения (наклепа), который характеризуется увеличением прочностных свойств и снижением пластичности металла. Для токоведущих жил данные изменения имеют особое значение, поскольку оказывают непосредственное влияние на электрическое сопротивление проводника и его эксплуатационные характеристики.

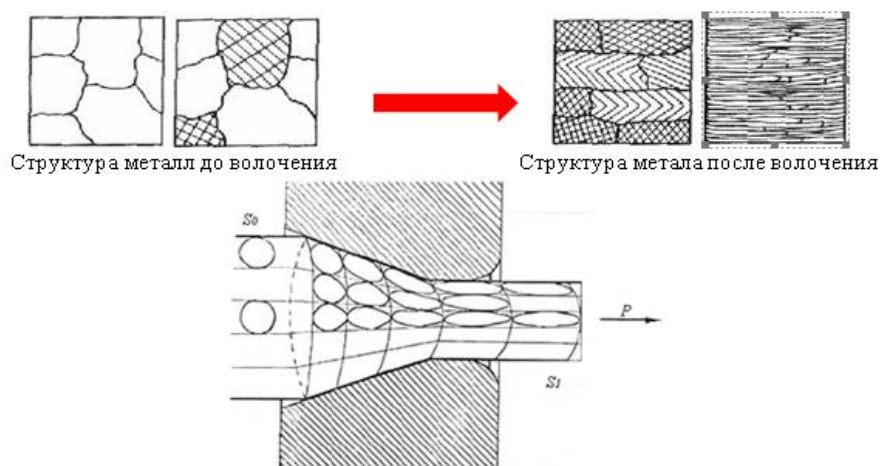


Рис. 1. Деформация протекающая в проволоке при волочении

Существенное влияние на процесс формообразования оказывает трение между поверхностью деформируемого металла и рабочим каналом фильеры. В зоне контакта возникают дополнительные касательные напряжения, вызывающие неоднородность распределения деформации по сечению проволоки и увеличение силы волочения.

Кроме того, значительная часть механической энергии, затрачиваемой на деформирование, преобразуется в тепловую энергию. Повышение температуры в очаге деформации сопровождается изменением физико-механических свойств металла, ускорением износа волоочильного инструмента и снижением стабильности технологического процесса.

Износ рабочей поверхности фильеры является одним из основных факторов, ограничивающих эффективность волоочильного производства. Изменение геометрии рабочего канала приводит к отклонению диаметра проволоки от номинального значения, увеличению овальности и ухудшению качества поверхности. Указанные дефекты оказывают отрицательное влияние на электрические и механические характеристики токоведущих жил и могут стать причиной снижения надежности готовых кабельных изделий.

Для уменьшения сил трения и снижения интенсивности износа инструмента в процессе волочения применяются различные смазочные материалы. Использование технологических смазок способствует снижению энергозатрат, уменьшению контактных напряжений, улучшению качества поверхности проволоки и повышению стойкости волоочильного инструмента. Однако даже при оптимальном выборе смазочных материалов полностью исключить влияние трения на процесс деформирования не представляется возможным.

Технологический процесс волочения реализуется на волоочильных машинах, представляющих собой сложные электромеханические системы, включающие приводные механизмы, волоочильные блоки, системы регулирования натяжения и контроля параметров процесса. Одним из важнейших показателей эффективности работы волоочильного оборудования является производительность, которая определяется количеством готовой продукции, выпускаемой в единицу времени. Существенное влияние на данный показатель оказывают остановки оборудования, связанные с обрывами проволоки, заменой изношенного инструмента и переналадкой технологической линии.

Анализ существующих технических решений по совершенствованию технологии волочения

Таблица 2

Техническое решение	Достоинства	Недостатки	Влияние на качество готового изделия
Применение алмазных и	Высокая износостойкость инструмента	Высокая стоимость	Повышение стабильности

твердосплавных фильер			диаметра проволоки
Использование современных смазочных материалов	Снижение сил трения и энергозатрат	Необходимость контроля состава смазки	Улучшение качества поверхности
Оптимизация маршрута волочения	Снижение нагрузки на оборудование	Ограниченная область применения	Повышение однородности деформации
Повышение скорости волочения	Рост производительности	Увеличение нагрева проволоки и инструмента	Возможное ухудшение структуры материала
Автоматизация управления процессом	Стабилизация технологических режимов	Увеличение стоимости оборудования	Снижение количества брака
Применение промежуточного отжига	Восстановление пластичности металла	Дополнительные энергозатраты	Улучшение механических свойств жилы
Совмещение фильерного и бесфильерного волочения	Снижение нагрузки на фильеру, уменьшение износа инструмента	Необходимость модернизации оборудования	Повышение стабильности диаметра и качества токоведущей жилы

Анализ физических процессов, протекающих при волочении, показывает, что дальнейшее повышение качества токоведущих жил и производительности оборудования требует совершенствования существующих технологий за счет снижения контактных нагрузок, уменьшения износа инструмента и обеспечения более равномерного распределения деформации в обрабатываемом материале. Решение данной задачи возможно на основе разработки новых технологических схем волочения и их предварительного исследования с использованием методов информационного и математического моделирования.

Техническое решение

Повышение экономической эффективности процесса волочения может быть достигнуто за счет совмещения фильерного и бесфильерного способов деформации [Патент РУз на полезную модель № FAR 00659 от 22.07.2010 г. «Волочильная

машина»]. Данный способ обеспечивает экономический эффект до 25 %, обусловленный увеличением срока службы волочильного инструмента. Вместе с тем его реализация требует модернизации существующей конструкции волочильной машины путем установки дополнительного функционального блока.

Назначение вспомогательного блока заключается в создании дополнительного растягивающего усилия на участке выхода проволоки из чистовой фильеры. Формирование дополнительного растяжения способствует стабилизации диаметра готовой проволоки и обеспечивает соответствие продукции установленным требованиям по геометрическим параметрам.

Внедрение рассматриваемого технического решения связано с рядом конструктивных и технологических ограничений, поскольку наличие вспомогательного блока не предусмотрено базовой конструкцией волочильной машины. В связи с этим перед реализацией модернизации необходимо выполнить комплекс расчетных исследований, направленных на оценку целесообразности внесения соответствующих изменений в действующий технологический процесс. Решение данной задачи предполагает разработку математической модели процесса волочения, позволяющей количественно оценить влияние предлагаемых конструктивных изменений на технологические и экономические показатели производства.

Моделирование предлагаемого способа включает следующие основные этапы:

1. Разработку информационных (визуальных) моделей существующей и модернизированной технологий волочения.
2. Построение математической модели объекта исследования — волочильной машины.
3. Одной из ключевых задач математического моделирования является получение инструмента для анализа и управления технологическим процессом на основе обоснованного выбора технических решений. Такой подход позволяет сформировать рациональное сочетание технологических, конструктивных и экономических параметров системы на основе предварительного анализа и отбора исходных данных.
4. При построении модели процесса волочения необходимо учитывать принципы теории подобия, включающие геометрическое подобие (Кирпичев), механическое подобие (Давиденков) и физическое подобие (Губкин). Соблюдение указанных критериев обеспечивает адекватность модели реальному технологическому процессу и достоверность получаемых результатов.
5. Технология моделирования предусматривает комплексный учет геометрических, механических и физических подобий. Реальная модель процесса должна отражать совокупность физических явлений, сопровождающих процесс волочения. Любое физическое воздействие приводит к возникновению

взаимосвязанных первичных и вторичных физических процессов, влияние которых необходимо учитывать при разработке и оптимизации технических решений [5].

6. Для анализа воздействия физических эффектов и обоснования проектных решений формируется иерархическая классификация физических явлений в виде статической информационной модели исследуемого процесса (рисунок 1). Представленная схема позволяет осуществлять последовательный отбор и систематизацию данных о физических эффектах, возникающих в процессе волочения, что служит основой для построения информационной модели и последующего математического описания объекта исследования.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, под физическим эффектом в рамках рассматриваемого процесса следует понимать технологический процесс волочения, при котором обрабатываемым объектом является медная проволока, подвергаемая воздействию продольной тянущей силы, формируемой рабочими органами волочильной машины. Данный физический эффект определяется совокупностью исходных характеристик обрабатываемого материала, включая диаметр заготовки и химический состав, тогда как его параметрическое описание включает диаметр исходной заготовки, диаметр готовой (отволоченной) проволоки и условие сохранения постоянства объема материала в процессе пластической деформации.



Рис.1. Физический эффект в процессе волочения

Физический эффект в процессе волочения (рис.1) целесообразно рассматривать как совокупность взаимосвязанных подсистем:

1. Общие физические эффекты, характерные для всего технологического процесса, включающие:

- квазистатические параметры: сила волочения, степень обжатия, натяжение, скорость волочения, тепловыделение и тепловой режим процесса, а также допустимые температурные границы нагрева проволоки;
- динамические параметры: колебания технологической системы, обусловленные нестабильностью энергоснабжения оборудования, импульсные нагрузки (рывки), возникающие при нарушениях режима питания, а также изменения свойств материала в процессе деформации, включая вариации коэффициента вытяжки.

2. Частные физические эффекты, характерные для отдельных элементов технологической системы, к которым относятся обрабатываемый материал, тянущий барабан, волочильный инструмент, смазочный состав и компенсирующие устройства. Данные эффекты подразделяются на:

- **квазистатические (инвариантные и условно-инвариантные) параметры,** при любых режимах деформации включающие процессы холодной пластической деформации медного прутка, формирование дополнительных сдвиговых напряжений, возникновение остаточных растягивающих напряжений, изменение температурного состояния системы, удлинение проволоки, сопротивление разрыву, контактное и внутреннее трение, высокотемпературные эффекты локального характера, единичные обжатия, а также характеристики взаимодействия поверхностей (смачиваемость металла и канала волочильного инструмента), структурную однородность материала;
- **параметры, зависящие от режимных условий,** к которым относятся геометрические и качественные отклонения продукции (диаметр проволоки, овальность, наличие металлической пыли и загрязнений), износ канала инструмента, деградация смазочной композиции, наличие примесей в материале, упрочнение структуры и изменение пластических свойств.

Динамические параметры включают:

- для всей системы движения: осевое скручивание проволоки, прогиб (провисание) обрабатываемого объекта;
- для локальных режимов функционирования: режим заправки и режим аварийной остановки технологического процесса.

Информационная модель технологического процесса включает структурированную совокупность данных, обеспечивающих формализацию последовательности этапов, стадий обработки и прогнозирование эффективности принимаемых технических решений. Контроль технологического процесса осуществляется на основе системы взаимосвязанных показателей:

- **C1** — характеристики исходного сырья (медь, алюминий) и методы его подготовки;

- **C2** — входные и выходные параметры материала (геометрические и физико-механические характеристики);
- **C3** — технологические режимы и рецептурные параметры процесса (скорость волочения, натяжение и др.);
- **C4** — качественные показатели готовой продукции (геометрические размеры, точность, стабильность диаметра);
- **C5** — стандарты качества и требования к внешнему виду продукции;
- **J1** — материальные ресурсы (сырьё: медь, алюминий);
- **J2** — энергетические ресурсы;
- **H** — технологическое оборудование (волочильные машины, сварочные установки, печи отжига);
- **Q1** — готовая продукция;
- **Q2** — технологические отходы и потери производства.

Отклонение хотя бы одного из регламентированных технологических параметров от установленных допустимых значений приводит к возникновению дефектов готовой продукции, включая несоответствие геометрических размеров, овальность поперечного сечения, образование технологических отходов, а также заправочных концов. При этом одной из ключевых характеристик, определяющих качество готовой проволоки, является стабильность и точность диаметра по всей длине изделия.

Последовательность основных операций технологического процесса волочения представлена на рисунке 2.

Рассматриваемый объект — технология процесса волочения (ТПВ) — представляет собой последовательно организованную систему взаимосвязанных технологических звеньев, каждое из которых оказывает энергетическое и механическое воздействие на перемещаемый металл, обеспечивая либо передачу, либо диссипацию энергии, включая тепловые потери, возникающие в процессе пластической деформации.

Отклонение хотя бы одного из регламентированных технологических параметров от установленных допустимых значений приводит к возникновению дефектов готовой продукции, включая несоответствие геометрических размеров, овальность поперечного сечения, образование технологических отходов, а также заправочных концов. При этом одной из ключевых характеристик, определяющих качество готовой проволоки, является стабильность и точность диаметра по всей длине изделия.

Последовательность основных операций технологического процесса волочения представлена на рис.2.

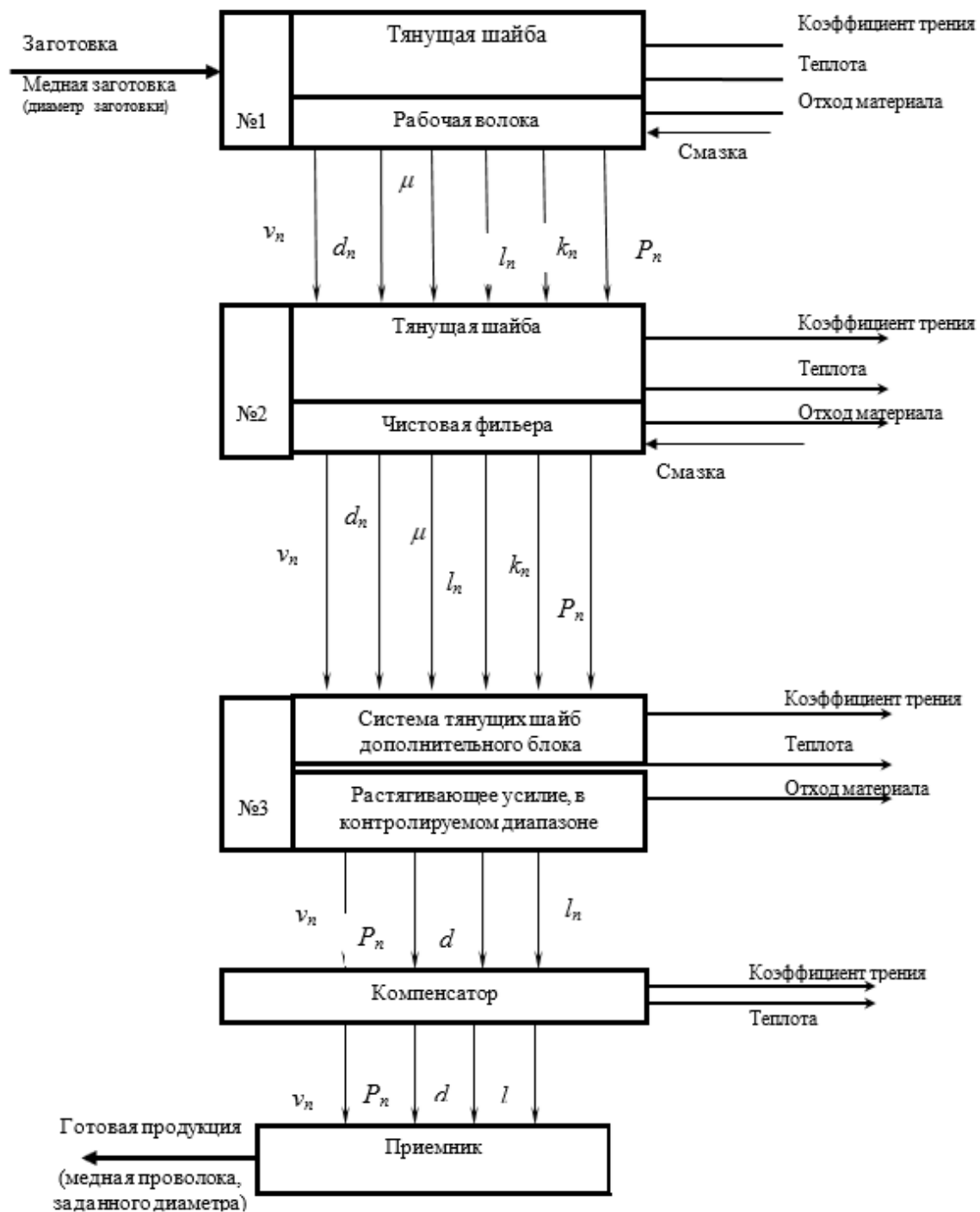


Рис.2. Основные операций технологического процесса волочения

Рассматриваемый объект — технология процесса волочения (ТПВ) — представляет собой последовательно организованную систему взаимосвязанных технологических звеньев, каждое из которых оказывает энергетическое и механическое воздействие на перемещаемый металл, обеспечивая либо передачу, либо

диссипацию энергии, включая тепловые потери, возникающие в процессе пластической деформации.

ВЫВОД:

Анализ технологической практики и результатов исследований процессов волочения свидетельствует о том, что определяющее влияние на устойчивость режимов деформирования и формирование выходных параметров изделия оказывает ограниченное число ключевых функциональных элементов технологической системы. К числу таких элементов относятся тянущий орган (шайба), волочильный инструмент (фильера) и обрабатываемый материал, образующие замкнутую энергетически и кинематически связанную систему.

Тянущий орган выполняет функцию генерации основного усилия волочения, которое является первичным управляющим параметром процесса продольной пластической деформации и определяет уровень напряженно-деформированного состояния металла в зоне обработки. Волочильный инструмент (фильера) реализует формирование геометрии поперечного сечения изделия и обеспечивает стабилизацию размерных характеристик проволоки за счет калибрующего воздействия, а также за счет условий контактного взаимодействия в системе «металл–инструмент», включающего нормальные и касательные напряжения, а также процессы трения и изнашивания [4].

Обрабатываемый металл следует рассматривать как активный элемент технологической системы, выполняющий одновременно функции носителя пластической деформации и структурно-энергетического связующего звена. В рамках системного подхода он обеспечивает передачу механической энергии между функциональными элементами процесса, а также формирует интегральный отклик системы в виде изменений геометрических, физико-механических и структурных характеристик материала.

Таким образом, рассматриваемая триада «тянущий орган – инструмент – материал» формирует базовый уровень структурной организации процесса волочения, определяющий его устойчивость, управляемость и воспроизводимость выходных параметров продукции в рамках заданных технологических режимов.

Список литературы:

1. Перлин И. Л., Ерманок М. З. Теория волочения. — М.: Металлургия, 1971. — 448 с.
2. Wistreich J. G. The Fundamentals of Wire Drawing // Metallurgical Reviews. — 1958. — Vol. 3, No. 1. — P. 97–142.
3. Rowe G. W. Wire Manufacture // International Metals Reviews. — 1977. — Vol. 22, No. 1. — P. 341–354.

4. Semiatin S. L. (ed.). ASM Handbook. Vol. 14A: Metalworking: Bulk Forming. — ASM International, 2005. — 448–458 p.
5. Wright R. N. Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.
6. Dieter G. E., Kuhn H. A., Semiatin S. L. Handbook of Workability and Process Design. — ASM International, 2003.
7. Avitzur B. Analysis of metal forming processes. — New York: McGraw-Hill, 1983.
8. Phelan P., Brandon J., Hillery M. Numerical modelling of defect formation on copper wire surfaces during the wire drawing process // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C. — 2001. — Vol. 215, No. 2. — P. 237–246.
9. Chin R. K., Steif P. S. A computational study of strain inhomogeneity in wire drawing // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 1995. — Vol. 35, No. 8. — P. 1087–1098.
10. Belalov Kh. N. et al. Steel Wire: Structure, Properties and Technology. — Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011.