

На правах рукописи



ТУКТАРОВ ЕВГЕНИЙ ЗИНУРОВИЧ

**МАЛОГАБАРИТНЫЙ СТАН ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВИНТОВОЙ
ПРОКАТКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ВАКУУМЕ**

Специальность 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 2013

Работа выполнена на кафедре инжиниринга технологического оборудования (ИТО) в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Горбатюк Сергей Михайлович**

Официальные оппоненты:

Роберов Илья Георгиевич доктор технических наук, главный технолог ФГУП «Научно-исследовательский институт стандартизации и унификации»

Стоппе Екатерина Викторовна кандидат технических наук, доцент НИТУ «МИСиС»

Ведущая организация:

ОАО «Институт Цветметобработка»

Защита состоится "22" мая 2013 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу:

119049, г. Москва, Ленинский проспект, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки НИТУ «МИСиС»

Автореферат разослан "19" апреля 2013 года

Справки по телефону: (495) 638-46-56

E-mail: irina@pdss.misis.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ионов С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Прутки и проволока из тугоплавких металлов находят широкое применение в электротехнической, электронной, оборонной промышленности. В подавляющем большинстве случаев эти изделия изготавливают из спеченных заготовок (штабиков), представляющих собой прутки квадратного сечения, получаемые методами порошковой металлургии. Наиболее трудоемкой операцией в процессе деформации штабиков является ротационная ковка с ручной подачей заготовки, применяемая для получения прутков круглого сечения диаметром 7-10 мм. К основным недостаткам ротационнойковки штабиков относятся малая производительность оборудования, низкий выход годной продукции и тяжелые условия труда, связанные с шумом, вибрацией, загрязнением окружающей среды токсичными соединениями тугоплавких металлов. Поэтому одной из актуальных задач в процессе совершенствования технологии производства изделий из тугоплавких металлов является устранение операции ротационнойковки с ручной подачей заготовки путем замены этого технологического передела более эффективным.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи – разработке оборудования для производства высококачественных заготовок из тугоплавких металлов в соответствии с Госконтрактом №.9253р/14958 от 06.05.2011 г. Работа выполнена в рамках программ Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «У.М.Н.И.К» и «Старт»¹

Цель работы.

Разработка нового оборудования и технологического инструмента для производства прутков из штабиков тугоплавких металлов на основе развития теоретического анализа геометрических, кинематических и энергосиловых параметров винтовой прокатки с использованием современных методов автоматизированного параметрического проектирования и виртуального исследования 3D моделей элементов разработанной конструкции с целью оценки ее работоспособности.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

- Усовершенствована методика расчета профиля валков стана винтовой прокатки, позволяющая проводить сравнительную оценку процессов, реализуемых в клетях различных конструкций.

¹ http://www.fasie.ru/fund_programms/umnik/umnik-index.aspx

- Разработана программа расчета калибровки валков, позволяющая с помощью системы 3D-моделирования Autodesk Inventor создавать и анализировать трехмерную параметрическую модель валков станов винтовой прокатки.
- Разработана 3D-модель рабочей клетки вакуумного стана винтовой прокатки с помощью которой выполнена оценка ее прочности и жесткости.
- Предложена методика оценки работоспособности цилиндрического соединения с натягом по условиям прочности и износостойкости.
- Усовершенствована математическая модель и разработана программа расчета нагрева и охлаждения вольфрамовых штабиков в вакууме.

Научная новизна.

- Универсальная методика расчета диаметра прокатываемой заготовки и величины зазора между валками по длине очага деформации на основе системы 3D-моделирования Autodesk Inventor.
- Результаты исследования калибровок валков, предназначенных для винтовой прокатки прутков диаметром 7 мм из заготовок диаметральный размером 15 мм, и способ производства прутков из вольфрамовых штабиков.
- Результаты виртуального исследования рабочей клетки вакуумного стана МАМП-10 на основе её 3D модели.
- Методика оценки работоспособности цилиндрического соединения с натягом, которая обеспечивает рациональный выбор посадки по условиям прочности соединяемых деталей и износостойкости контактных поверхностей.
- Математическая модель расчета температуры прокатываемых заготовок, позволившая оптимизировать термомеханические режимы обработки заготовок из пористых материалов.

Практическая значимость

- Разработана новая конструкция малогабаритного стана МАМП-10, предназначенного для высокотемпературной винтовой прокатки заготовок из тугоплавких металлов в вакууме.
- Рассчитана и внедрена на Светловодском казенном комбинате твердых сплавов и тугоплавких металлов (СККТСиТМ) калибровка валков, предназначенная для прокатки прутков диаметром 7,3 мм из вольфрамовых штабиков 10,5x10,5 мм, и выпущена опытная партия прутков диаметром 7,3 мм марки ВА, полученная винтовой прокаткой валками предложенной калибровки. Качество полученных прутков соответствует ГОСТ 23949-80.

- В условиях Государственного предприятия «Инженерный центр твердых сплавов «Светкермет» из этих прутков были изготовлены катоды электронных пушек размером 3x0,6x115 мм, которые отличаются повышенной стойкостью.
- Разработано и передано ОАО «ЭЗТМ» автоматизированное рабочее место калибровщика валков стана винтовой прокатки.
- Разработана конструкция вводной экранирующей проводки, позволяющей снизить охлаждение заднего конца прокатываемой заготовки.

Результаты работы используются в учебном процессе в рамках курса «Автоматизированное проектирование оборудования и технологий», при выполнении курсовых и дипломных проектов, выпускных работ студентами, обучающимися по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» и по направлению 151000 «Технологические машины и оборудование»

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена соблюдением соответствующих современных методик при проведении экспериментов, проверкой математической модели на адекватность и подтверждена хорошим соответствием экспериментальных данных с результатами расчетов.

Апробация работы.

Основные результаты и положения диссертации доложены на конкурсе студенческих работ им. А.И. Целикова (Москва, ВНИИМЕТМАШ, 2008 г.); международной, межвузовской и институтской научно-технической конференции «64-е дни науки студентов МИСиС» (Москва, НИТУ «МИСиС», 2009 г.); VI Международную научно-техническую конференцию «Инновационные технологии обработки металлов давлением» (посвящается 100-летию со дня рождения проф. д.т.н., академика АН КазССР П.И. Полухина «МИСиС», 2011 г.), объединенном научном семинаре кафедр ИТО и ТОТП НИТУ «МИСиС» (Москва, 2013 г.).

Публикации. Основное содержание работы отражено в 14 опубликованных работах, две из которых – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Она изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка и 8 таблиц. Библиографический список включает 92 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан анализ технологических процессов и оборудования для производства тугоплавких металлов, обоснован выбор направления исследований,

показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований.

Первая глава посвящена обзору научно-технической и патентной литературы.

Одним из эффективных способов деформации штабиков тугоплавких металлов является винтовая прокатка. Впервые метод винтовой прокатки сплошных тел в трехвалковом стане был предложен ВНИИМЕТМАШем (А.И. Целиков) для прокатки периодических профилей диаметром 10-20 мм. В МВТУ им. Баумана (В.А. Жаворонков, Г.Г. Мухин) были прокатаны прутки сплошного сечения диаметром 20 мм с большими коэффициентами вытяжки за проход (до 12). В Московском энергетическом институте (Р.М. Голубчик) получены положительные результаты при прокатке прутков в стане винтовой прокатки со смещенной осью. Для производства прутков эффективно применяются министаны винтовой прокатки (Б.А. Романцев, С.П. Галкин), литейно-прокатные агрегаты с клетями поперечно-винтовой прокатки разработки ВНИИМЕТМАШ.

В процессе высокотемпературной деформации тугоплавких металлов происходит их окисление и насыщение кислородом, азотом и другими активными компонентами воздуха, что приводит к снижению пластичности и разрушению металла, поэтому при нагреве тугоплавких металлов до температур выше 1000 °С необходима их защита от окисления.

В 1990-е годы МИСиС совместно с ЭЗТМ (И.Н. Потапов, П.М. Финагин, С.М. Горбатюк, и др.) разработали серию станов винтовой прокатки, предназначенных для производства прутков из тугоплавких металлов. Основным недостатком конструкции этих станов были большие габариты и высокая стоимость оборудования. Не удалось реализовать в промышленных условиях вакуумирование процесса прокатки. Наконец, в связи с распадом СССР отрасль промышленности, перерабатывающая тугоплавкие металлы, оказалась в состоянии стагнации и большая часть оборудования пришла в негодность. Тем не менее, промышленные испытания этих станов показали эффективность применения винтовой прокатки для деформации штабиков тугоплавких металлов.

Проведенный анализ существующих способов обработки тугоплавких металлов, методов винтовой прокатки сплошных заготовок, конструктивных особенностей вакуумных прокатных станов позволил сделать вывод о том, что для возрождения перспективного способа деформации штабиков тугоплавких металлов винтовой прокаткой в вакууме необходимо создание нового оборудования, которое отвечало бы комплексу следующих требований.

1. Деформация заготовок должна проводиться в 3-хвалковой клетке.
2. Рабочие валки и элементы конструкции стана должны воспринимать значительные нагрузки и обладать высокой износостойкостью.
3. Нагревательное оборудование должно обеспечивать нагрев заготовки перед прокаткой до температуры не менее 1300 °С.
4. Зоны нагрева, деформации и охлаждения проката должны быть герметизированы и сохранять рабочий вакуум 0,1-10 Па.

Вторая глава посвящена разработке нового способа винтовой прокатки прутков диаметром 7 мм из вольфрамовых штабиков сечением 10,5x10,5мм в новом калибре рассчитанном по усовершенствованной методике проектирования валков станов винтовой прокатки. Здесь же приведены результаты исследования очага деформации при прокатке на основе САПР Autodesk Inventor.

Различные схемы прокатки (продольная, поперечная, винтовая) отличаются друг от друга взаимным положением осей валков и оси прокатываемой заготовки. Процесс винтовой прокатки реализуется лишь в том случае, когда ось прокатки и ось валка являются скрещивающимися прямыми (рис. 1), взаимное положение которых в пространстве однозначно определяется двумя параметрами: α - углом между осями валка и прокатки; ρ - расстоянием между осями валка и прокатки.

При винтовой прокатке $\rho \neq 0$ и $\alpha \neq 0$ причем $\alpha \neq 90^\circ$. В этом случае прокатываемая заготовка совершает поступательное и вращательное движение со скоростями v и ω соответственно (рис. 1).

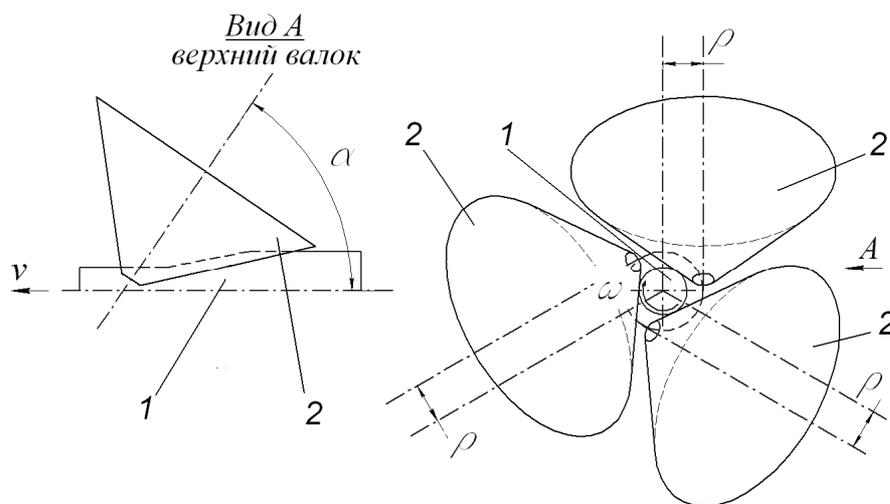


Рис. 1 - Схема винтовой прокатки: 1 - прокатываемая заготовка, 2 – валок

Впервые параметры α и ρ для расчета профиля очага деформации в зависимости от формы валка применил Ю.М. Миронов. Не менее актуальной является обратная задача:

расчет профиля валка в зависимости от задаваемого профиля очага деформации.

В работах С.М. Горбатюка приведена методика расчета калибровки валка в зависимости от задаваемого профиля очага деформации и отмечено, что рассчитанная калибровка валка обеспечит задаваемый профиль очага деформации только для случая поперечной прокатки. Во всех других случаях реальный профиль очага деформации будет отличаться от задаваемого. Там же приведена методика оценки величины этого отклонения путем решения обратной задачи: расчета профиля очага деформации $r(x)$ в зависимости от заданной калибровки валка $R(X)$ и параметров α и ρ и проверки величины зазора между валками трехвалковой клетки стана винтовой прокатки.

С появлением современных систем автоматизированного проектирования (САПР) перечисленные выше задачи могут быть решены более простыми и наглядными способами.

Автором разработана программа² в виде Web-приложения³ расчета калибровки валка $R(X)$ в зависимости от заданного профиля очага деформации $r(x)$ и параметров α и ρ адаптированная к САПР Autodesk Inventor. Результаты расчета калибровки валка $R(X)$ выводятся в виде иллюстрации (рис. 2, а), в формате *.dwg и в виде таблицы формата Microsoft Excel. Полученные результаты передаются в САПР Autodesk Inventor, в которой по предложенному автором алгоритму создается трехмерная модель валков рассчитанного профиля (рис. 2, б).

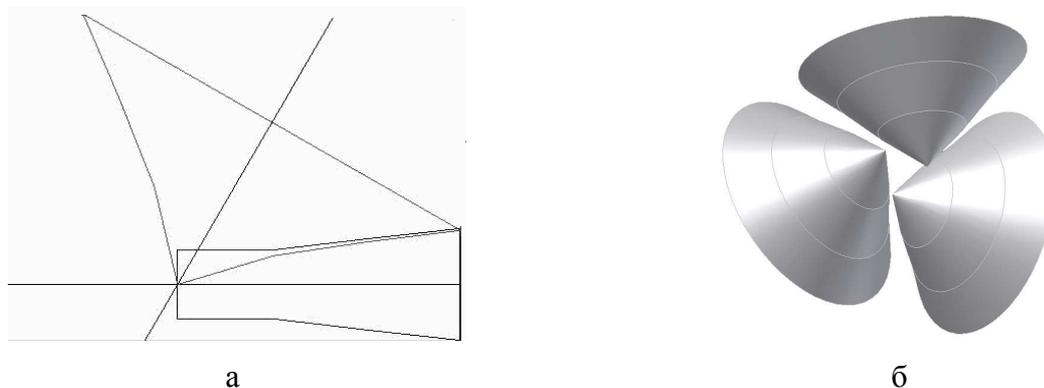


Рис. 2 - Визуализация схемы прокатки, полученная по разработанной программе (а) и в САПР Autodesk Inventor (б), рассчитанная для прокатки прутка диаметром 7 мм при $\alpha=60^\circ$ и $\rho=3,5$ мм

Графическое исследование сечений такой модели на двухмерном чертеже

² Осадчий В.А., Горбатюк С.М., Туктаров Е.З. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012610750. Расчет геометрических, кинематических и энергосиловых параметров винтовой прокатки. Заявка №20116118657 от 13.10.2011 г. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.01.2012.

³ Программа размещена на сайте МИСиС <http://econom.misis.ru/>

позволяет легко определить диаметр прокатываемой заготовки d в зависимости от координаты его сечения x и величину зазора между валками в рассматриваемом сечении путем прямого измерения.. На рис. 3 приведен пример исследования калибровки валков стана винтовой прокатки МАМП-10, рассчитанной для прокатки прутков диаметром 7 мм.

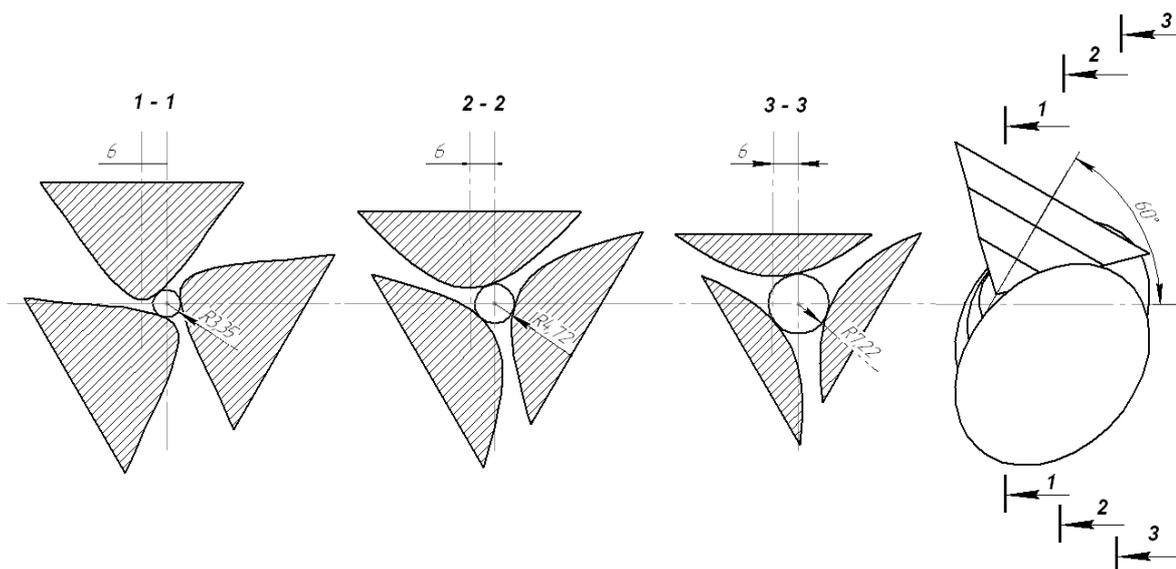


Рис. 3 - Результаты исследование калибровки валков стана винтовой прокатки РСПВ-10

Следует отметить, что разработанная методика является универсальной и может быть использована при проектировании валков станом винтовой прокатки различных конструкций (рис. 4).

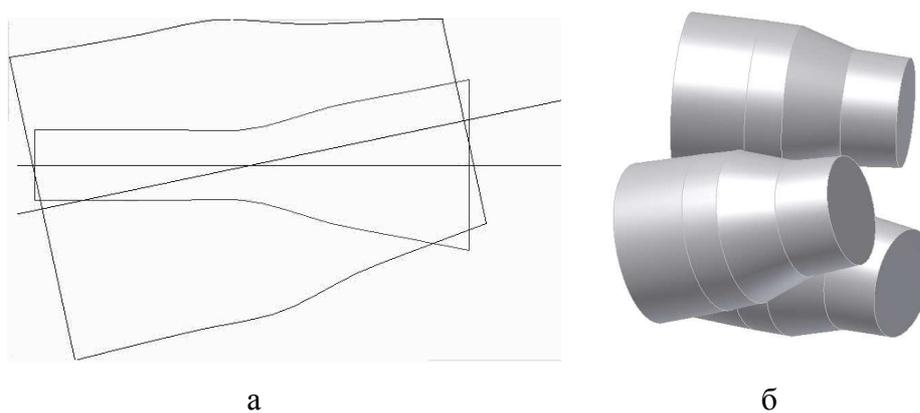


Рис. 4 - Визуализация схемы прокатки, полученная по разработанной программе (а) и в САПР Autodesk Inventor (б), для прокатки прутка диаметром 7 мм при $\alpha=12^\circ$ и $\rho=20$ мм

По разработанной методике для стана РСПВ-10 СКТСиТМ была рассчитана и исследована новая калибровка валков, на основании которой был разработан новый способ винтовой прокатки прутков диаметром 7,5 мм из вольфрама марки ВА сечением 10,5x10,5 мм. Новая калибровка, в сравнении с ранее используемой, позволила

существенно повысить качество поверхности получаемых прутков за счет увеличения длины калибрующего участка очага деформации. В частности, длину калибрующего участка удалось увеличить с 12 до 15 мм, что позволило снизить величину отклонения от цилиндричности поверхности проката с 0,1 до 0,05 мм.

Третья глава посвящена разработке нового оборудования и исследованию 3D-модели рабочей клетки малогабаритного стана для высокотемпературной винтовой прокатки вольфрамовых штабиков сечением 10,5x10,5 мм в вакууме.

В НИТУ МИСиС на кафедре машин и агрегатов металлургических предприятий (каф. МАМП) разработана конструкция малогабаритного вакуумного стана винтовой прокатки МАМП-10. Автор принимал активное участие в этих работах, в частности, выполнил проект вакуумной рабочей клетки оригинальной конструкции⁴, спроектировал рабочие валки, усовершенствовал вводную проводку.

Проектирование стана велось на основе теоретических расчетов, с учетом результатов анализа отечественных и зарубежных конструкторских решений.

При проектировании к оборудованию предъявлялись следующие основные требования:

- возможность деформации заготовок диаметральным размером 10-15 мм до получения прутков диаметром 7-10 мм;
- достаточно высокая прочность и жесткость механизмов и узлов прокатной клетки;
- необходимость высокотемпературного нагрева заготовок перед прокаткой;
- возможность герметизации зон нагрева, деформации и охлаждения металла;
- обеспечение условий для быстрой смены рабочих валков;

Стан МАМП - 10 (рис. 5) представляет собой комплекс прокатного, вакуумного и нагревательного оборудования, предназначенного для высокотемпературной винтовой прокатки прутков малых диаметров в вакууме. Трехвалковая рабочая клетка стана (рис. 6) состоит из станины 1, в расточках которой через 120° смонтированы узлы рабочих валков 2. Герметичность зоны деформации обеспечивают вакуумные уплотнения 3, расположенные в крышках подшипниковых узлов. Рабочие валки смонтированы на приводных валах 4, крутящий момент которым передается через зубчатую передачу 5 от электродвигателей 6. Валки расположены в клетке под углом 60° к оси прокатки и тангенциально смещены относительно ее на 7 мм. Параметры, характеризующие взаимное

⁴ Вакуумная клетка стана винтовой прокатки. Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау Отдела защиты интеллектуальной собственности №35-022-2009 ОИС от 03.12.2009.

Рабочая клетка вакуумного стана винтовой прокатки МАМП-10. Решение о выдаче патента РФ от 26.12.12 по заявке № 2011133288 от 08.08.2011

положение осей прокатки и валков были определены в результате изучения опыта эксплуатации стана РСПВ-10 СККТСиТМ.

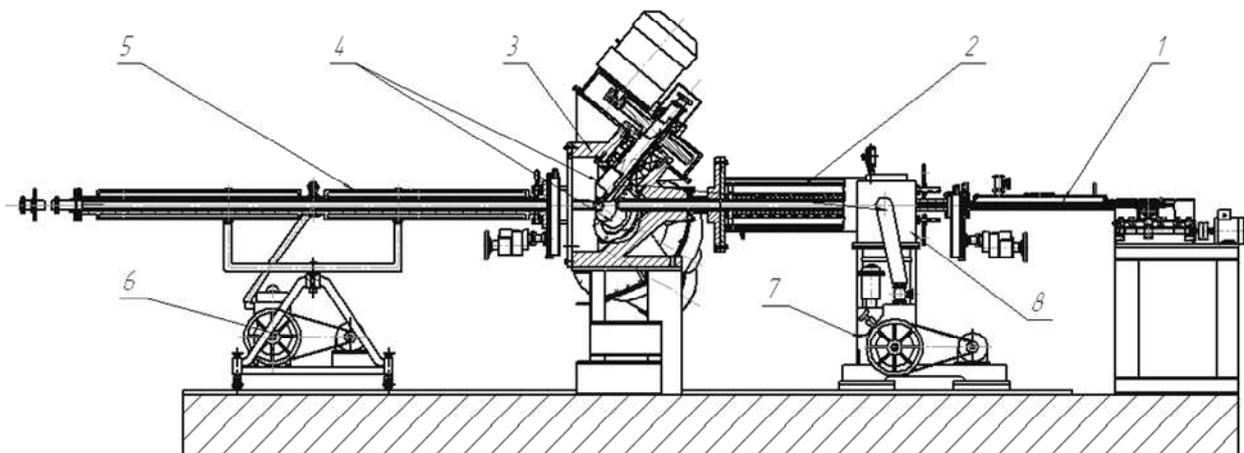


Рис. 5 - Вакуумный стан винтовой прокатки МАМП-10: 1 – устройство загрузки заготовок, 2 – нагревательная печь, 3 – прокатная клеть, 4 – рабочие валки, 5 – устройство выгрузки проката, 6,7 – механические вакуумные насосы, 8 – высоковакуумный агрегат

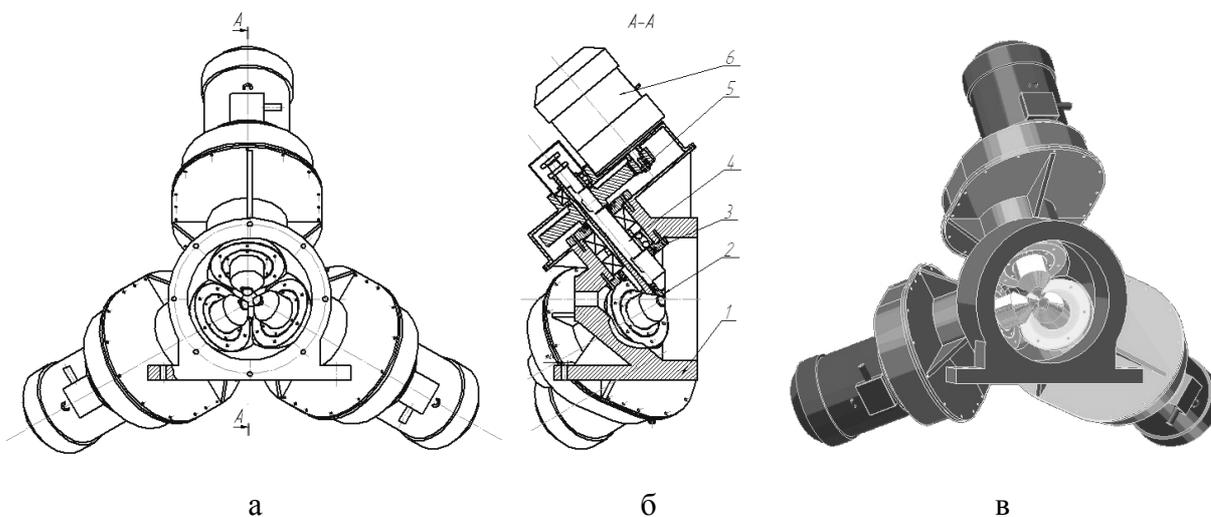


Рис. 6 - Рабочая клеть стана МАМП-10: а – фронтальный вид, б – разрез по оси прокатки в – 3D модель (пояснения в тексте).

Герметизация стана выполнена по типу «валки-камера», при котором в вакууме находятся только рабочие валки. Остальные элементы конструкции валковых узлов (подшипники, зубчатые колеса и т.п.) вынесены за пределы вакуумной камеры, благодаря чему существенно упрощается способ их смазки.

Для оценки работоспособности элементов конструкции стана МАМП-10 в САПР Autodesk Inventor была разработана 3-D модель его рабочей клетки. Моделирование

наиболее ответственных элементов конструкции было выполнено в параметрической форме, что позволило провести оперативный анализ напряжений и деформаций, действующих в деталях в зависимости от внешних нагрузок. Технические характеристики стана приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики стана МАМП-10

Наименование характеристики	Ед. изм.	Значение параметра
Мощность привода валков	кВт	3×11
Максимальный диаметр валков	мм	40
Угол наклона валков к оси прокатки	град	60
Тангенциальное смещение валков	мм	7
Частота вращения валков	об/мин	250
Максимальная температура нагрева	°С	1300
Объем вакуумных камер	м ³	0,005
Рабочий вакуум	Па	0,1 - 10
Максимальный диаметр заготовки	мм	20
Минимальный диаметр проката	мм	5
Максимальная длина проката	мм	1500
Масса рабочей клетки	кг	850

В четвертой главе рассматриваются вопросы обеспечения работоспособности цилиндрических соединений с натягом, и приводится методика расчета посадки с натягом цилиндрических соединений малогабаритного стана, которая обеспечивает рациональный выбор посадки по условиям прочности соединяемых деталей и износостойкости контактных поверхностей.

Соединение с натягом должны гарантировать фиксацию контактирующих поверхностей без их относительного проскальзывания. Это реализуется за счет назначения соответствующих натягов. Вследствие разброса значений коэффициента трения и натяга при приложении внешней (чрезмерной) нагрузки и вибрации может возникнуть относительное смещение контактирующих поверхностей, что отрицательно сказывается на дальнейшей способности передавать полную нагрузку. При действии переменных нагрузок, особенно в момент пуска и остановки, на сопряженных поверхностях у торцов соединяемых деталей возникают микроперемещения и фреттинг-коррозия (И.В.Крагельский, Б.И. Костецкий, Ю.В.Жиркин и др.).

При рассмотрении процессов изнашивания все характеристики, относящиеся к микрогеометрии поверхности, могут быть объединены безразмерным комплексным параметром

$$\Delta_{шер} = \frac{R_{max}}{r_{экв} \cdot \sqrt[3]{b}} \quad (1)$$

Здесь R_{max} - наибольшая высота неровностей профиля, b и ν - параметры опорной кривой профиля, $r_{экв}$ - приведенный средний радиус кривизны вершин выступов, равный

$$r_{ср} = \frac{r_{прод} \cdot r_{попер}}{r_{прод} + r_{попер}}$$

где $r_{прод}$ и $r_{поп}$ - средние значения радиусов кривизны вершин выступов в продольном и поперечном направлениях.

Принципиально важным здесь является то, что наряду с классом шероховатости большое значение играет и технология обработки поверхностей, от которой зависят остальные характеристики, входящие в формулу (1). Для приработанных поверхностей, которые характеризуются равновесной шероховатостью, параметры опорной кривой профиля принимают достаточно устойчивые значения $b \approx \nu \approx 2$.

При проектировании соединений с натягом следует руководствоваться следующими основными рекомендациями.

1) На поверхностях трения должно реализовываться внешнее трение, которое определяется условием отсутствия смазочного материала.

$$p \leq \frac{0,125 \cdot HB}{\Delta_{шер}^2} \cdot \left[1 - 6 \cdot \left(\frac{\tau_0}{HB} + \beta \right) \right]$$

Здесь HB - твердость по Бринеллю менее твердого материала, МПа; $\Delta_{шер}$ - комплексная характеристика шероховатости; τ_0 и β - фрикционные параметры, которые определяют величину касательных напряжений, возникающих в результате молекулярных воздействий; для большинства пар трения «металл-металл» без смазки $\tau_0 = 2,5 \dots 3$ МПа и $\beta = 0,02 \dots 0,15$.

2) Для предотвращения заедания поверхностей при разборке соединения шероховатость более твердой поверхности должна соответствовать условию

$$\Delta_{шер} \geq 2,3 \cdot HB \cdot \Theta^2 \cdot \sqrt{\frac{HB}{p}}$$

где $\Theta = (1 - \mu^2)/E$ - упругая постоянная, м²/МПа; μ - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости, МПа; p - давление, МПа.

3) Величина давления не должна превышать значения, соответствующего переходу упругопластических деформаций в пластические

$$p > 7,5 \cdot \Delta_{\text{пер}}^2 \cdot HB^5 \cdot \Theta^4 .$$

4) При подборе материалов пары трения необходимо учитывать возможность их схватывания.

Контактное давление p , МПа, связано с натягом N , м, зависимостью Ляме

$$p = \frac{N}{d \cdot C'} \quad (2)$$

где N – натяг в соединении, м; d – посадочный диаметр, м; C – коэффициент МПа^{-1} , определяемый по формуле

$$C = \frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} = \frac{1}{E_1} \left[\frac{1 + \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^2} - \mu_1 \right] + \frac{1}{E_2} \left[\frac{1 + \left(\frac{d}{d_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{d}{d_2}\right)^2} - \mu_2 \right] \quad (3)$$

Здесь d_1 – диаметр отверстия охватываемой детали (для сплошного вала $d_1 = 0$); d_2 – наружный диаметр охватывающей детали, м; E_1 и E_2 – модули упругости материала охватываемой и охватывающей поверхности, МПа; μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона материала охватываемой и охватывающей детали.

В цилиндрических соединениях с натягом между контактирующими поверхностями, как правило, реализуется пластический ненасыщенный или насыщенный контакт.

Пластический насыщенный контакт реализуется в случае, если

$$N > 0,124 \cdot K_{\text{сб}} \cdot HB \cdot d \cdot C$$

где $K_{\text{сб}}$ – коэффициент сборки (при тепловой сборке - $K_{\text{сб}} = 1$, при прессовой сборке - $K_{\text{сб}} = 0,5$); HB – твердость менее твердого тела, МПа; d – посадочный диаметр, мм; C – коэффициент, определяемый по формуле (3).

Максимально допустимый момент, не вызывающий изменения прочности соединения с натягом в условиях насыщенного пластического контакта, определяется по формуле

$$[M] = \left[\frac{f_m \cdot N}{d \cdot C} + 0,378 \cdot \frac{\sqrt{\Delta_{\text{пер}}}}{\sqrt[4]{HB}} \cdot \sqrt{\left\{ N \left[1 - \left(\frac{d_2}{d}\right)^2 \right] \right\}^3} \right] \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l}{2} \quad (4)$$

где f_m - молекулярная составляющая коэффициента трения, значение которой для практических расчетов можно принимать равной 0,12; l - длина контактной поверхности, м.

Пластический ненасыщенный контакт происходит в случае, если величина натяга N удовлетворяет условию

$$0,124 \cdot K_{cб} \cdot HB \cdot d \cdot C > N > 14,5 \cdot d \cdot \Theta^4 \cdot HB^5 \cdot C / (\Delta_{шер})^2$$

Здесь d – посадочный диаметр, мм; $\Delta_{шер}$ – безразмерный комплексный показатель шероховатости; $\Theta = (1 - \mu^2)/E$ - упругая постоянная, МПа⁻¹; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости менее твердого тела, МПа; HB – твердость менее твердого тела, МПа; C – коэффициент, определяемый по формуле (3).

Максимально допустимый момент $[M]$, не вызывающий изменения прочности соединения с натягом в условиях ненасыщенного пластического контакта, определяется по формуле

$$[M] = \left[\frac{f_m \cdot N}{d \cdot C} + 0,177 \cdot \frac{\sqrt{\Delta_{шер}}}{\sqrt[4]{HB}} \cdot \sqrt[4]{N \left[1 - \left(\frac{d_2}{d} \right)^2 \right]} \right] \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l}{2} \quad (5)$$

Расчеты показывают, что для большинства инженерных приложений в приведенных формулах (4) и (5) для максимально допустимого момента вторым слагаемым можно пренебречь. Тогда для обоих случаев формула для допускаемого момента принимает вид

$$[M] \approx 0,18 \cdot N \cdot d \cdot l / C \quad (6)$$

Минимально допустимая величина натяга N_{min} находится при приравнении допустимого значения момента соответствующим значениям технологических моментов сопротивления M , т.е.

$$N_{min} \geq \frac{5,55 \cdot M \cdot C}{d \cdot l} - \Delta N \quad (7)$$

где ΔN – уменьшение натяга при прессовой сборке; при тепловой сборке - $\Delta N = 0$.

Максимальный расчетный натяг $N_{max,p}$ определяется из решения задачи о расчете толстостенных цилиндров и сводится к проверке на прочность в опасных точках, в которых действуют наибольшие напряжения растяжения и сжатия:

- на внутренней поверхности охватываемой детали

$$\sigma_1 = \sigma_{t2} = p \cdot \frac{d_2^2 + d^2}{d_2^2 - d^2}; \quad \sigma_3 = \sigma_{r2} = -p; \quad (8)$$

- на внутренней поверхности охватываемой детали

$$\sigma_1 = 0; \quad \sigma_3 = \sigma_{t1} = -2 \cdot p \cdot \frac{d^2}{d^2 - d_1^2} \quad (9)$$

По теории наибольших касательных напряжений условие прочности имеет вид

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_T \quad (10)$$

С учетом этого выражения из формул (8) и (9) получим

$$p_{\text{max}2} = \sigma_{T2} \cdot \frac{d_2^2 - d^2}{2 \cdot d_2^2}; \quad p_{\text{max}1} = \sigma_{T1} \cdot \frac{d^2 - d_1^2}{2 \cdot d^2}. \quad (11)$$

Из двух значений p_{max} меньшее значение ограничивает величину допускаемого давления, определяемого по формуле (2). Опасным элементом, как правило, является охватываемая деталь, и поэтому для сплошного вала ($d_1 = 0$) получим $p_{\text{max}} = \sigma_{T1}/2$. Тогда максимально допустимая расчетная величина натяга $N_{\text{max},p}$ согласно формулы (2) будет равна

$$N_{\text{max},p} = p_{\text{max}} \cdot d \cdot C = \frac{d \cdot \sigma_{T1} \cdot C}{2} \quad (12)$$

Поскольку при сборке соединения происходит сглаживание шероховатостей, то максимальный фактический натяг N_{max} принимают больше, полученного по формуле (12), на высоту неровностей профиля сопрягаемых поверхностей, т.е.

$$N_{\text{max}} = N_{\text{max},p} + 1,2 \cdot (R_{z1} + R_{z2}) \quad (13)$$

Обычно поверхности охватываемых деталей (валов) обрабатывают с шероховатостью $R_{z1} = 0,4 \dots 3,2$ мкм, а охватывающих (отверстий) - с шероховатостью $R_{z2} = 0,8 \dots 6,3$ мкм. Поэтому

$$N_{\text{max}} = N_{\text{max},p} + (2 \dots 10) \text{ мкм}. \quad (14)$$

По полученным расчетным величинам натяга N_{max} и N_{min} подбирается соответствующая стандартная посадка; чаще всего применяют посадки $H7/p6$, $H7/r6$, $H7/s6$, $H7/t7$, $H7/z6$, $H7/u7$.

Разработанная методика оценки работоспособности цилиндрического соединения с натягом по условиям прочности и износостойкости использована для выбора посадки твердосплавной вставки в стальной валок.

На основании проведенных исследований по предложенной инженерной формуле (4) для определения величины максимально допустимого момента при реализации в цилиндрическом соединении пластически ненасыщенного или насыщенного контакта были рассчитаны посадки с натягом для двух вариантов исполнения составных рабочих валков: для стана РСРВ-10 и стана МАМП-10.

В пятой главе дано описание разработанной математической модели и программы

расчёта нагрева и охлаждения заготовки в защитной среде, а так же приведены результаты исследования влияния режимов термомеханической обработки штабиков при винтовой прокатке на температуру заднего конца прокатываемой заготовки.

Разработанная математическая модель предназначена для решения плоской температурной задачи для сечения прямоугольной формы.

При охлаждении металла имеет место нестационарный тепловой поток описываемый законом теплопроводности:

$$\frac{\partial(c \cdot \rho \cdot T)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (15)$$

где T – температура металла, К;

x, y, z – координаты;

τ – время.

λ – коэффициент теплопроводности;

ρ – плотность;

c – теплоёмкость;

Уравнение (15) решается с учётом начальных и граничных условий, отражающих исходное состояние металла и особенности теплообмена на различных стадиях процесса.

Учитывая то, что штабик имеет значительно большую длину, чем размеры поперечного сечения, можно считать, что достаточно рассматривать двухмерное температурное поле.

Используем граничные условия третьего рода, определяющие температурный поток на границе тела:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha \cdot (T - T_c),$$

где $\frac{dT}{dn}$ - производная по нормали к поверхности;

α - коэффициент теплоотдачи.

T_c - температура окружающей среды (воздуха), К.

Начальное распределение температур в поперечном сечении заготовки выражаем в виде параболы второго порядка:

$$T_0(x, y) = T_{y0} - (T_{y0} - T_{n0}) \cdot \left(\frac{z}{z_n} \right)^2,$$

где T_n, T_y - температура металла на поверхности и в центре;

z - расстояние от точки до центра;

z_n - расстояние от точки на поверхности до центра в данном направлении.

Из-за сложности полученных аналитических зависимостей для расчёта температуры металла, а также изменения теплофизических параметров в ходе технологического процесса, решение температурной задачи производится численным методом. С этой целью был использован хорошо зарекомендовавшим себя методом сеток, заключающийся в замене производных разностями. Метод позволяет по заданному распределению температуры в узлах сетки в данный момент времени вычислить распределение температуры во внутренних узлах в следующий момент времени:

$$\tau_n = \tau + \Delta \tau,$$

где $\Delta \tau$ - шаг по времени.

Для численного решения дифференциального уравнения (15) была использована пятиточечная одношаговая явная разностная схема и соотношения, заменяющие производные конечными разностями.

При решении уравнения с помощью конечных разностей с использованием явной схемы для обеспечения устойчивости вычислений к величине шага по времени предъявляются определённые требования. Для внутренних точек сетки отношение между максимальной длительностью временного интервала и размером сетки составляет:

$$\Delta \tau_{max} = \frac{c \cdot \rho \cdot (\Delta x)^2}{2 \cdot \lambda}$$

Для периферийных точек при расчете временного интервала учитываются краевые условия. Временной интервал для точек на поверхности тела выражается соотношением:

$$\Delta \tau_{max} = \frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{\alpha}{\lambda \cdot \Delta x} \right)}$$

При отсутствии внутренних источников тепловыделений должно выполняться соотношение:

$$\frac{\Delta \tau}{h^2} \leq \frac{1}{4 \cdot a_{max}}$$

где a_{max} - максимальное значение коэффициента температуропроводности для сечения в текущий момент времени, h - шаг сетки

При решении температурной задачи важное значение имеют теплофизические характеристики - теплоёмкость, теплопроводность, коэффициент линейного расширения, плотность, коэффициент теплоотдачи. Они зависят от физической природы материала, его температуры и являются функциями координат:

$$c_{j,i,t} = f(T_{j,i,t}, x, y, z);$$

$$\lambda_{j,i,t} = f(T_{j,i,t}, x, y, z);$$

$$\rho_{j,i,t} = f(T_{j,i,t}, x, y, z),$$

где i, j, k - индексы узловых точек сетки.

Для эффективного моделирования температуры металла были получены аналитические зависимости в виде уравнений регрессии (16), позволяющие вычислять с применением компьютера упомянутые выше физические характеристики металла в виде функций температуры с достаточной для практических расчётов точностью.

$$\lambda = 123.83 - 0.047081 \cdot T + 17.283 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (16)$$

Относительное среднеквадратическое отклонение 4.64 %

$$c = 124.44 + 20.7583 \cdot 10^{-3} \cdot T + 2.5879 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (17)$$

Относительное среднеквадратическое отклонение 1.807 %

При винтовой прокатке штабиков тугоплавких металлов существует вероятность недопустимого остывания заднего конца прокатываемой заготовки. Повышение температуры заднего конца прокатки при постоянной скорости прокатки может быть достигнуто экранированием зоны между нагревательной печью и рабочими валками.

Для экспериментального исследования влияния теплозащитного экрана на скорость охлаждения нагретого штабика было спроектировано и изготовлено устройство, схема которого приведена на рис. 7.

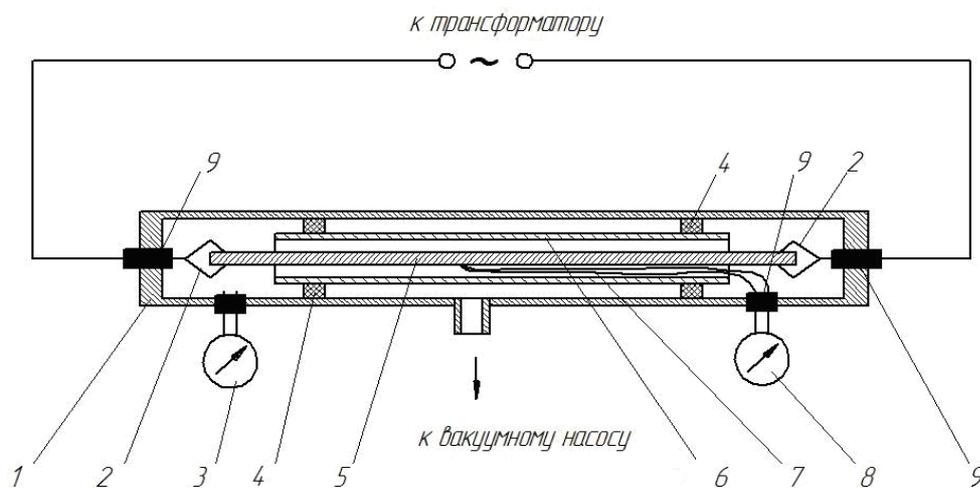


Рис. 7 – Схема устройства для измерения скорости охлаждения штабиков: 1 – корпус вакуумной камеры, 2 – зажим-электрод, 3 – вакуумметр, 4 – опора-термоизолятор, 5 – исследуемый штабик, 6 – экран, 7 – термопара, 8 – вольтметр, 9 – вакуумные уплотнения.

В качестве экрана использовали молибденовый лист ВМ-1, ГОСТ1 90022-71 толщиной 0,2 мм, свернутый в трубу. Проведенные исследования показали, что деформация штабиков ВА 10,5x10,5мм в вакууме при скоростях прокатки 0,05-0,07 м/с

может быть осуществлена только с использованием теплозащитных экранов. Без их использования наблюдается недопустимое падение температуры заднего конца заготовки (рис. 8).

На основании статистической обработки результатов исследования скорости охлаждения штабиков марки ВА сечением 10,5x10,5 мм были получены регрессионные зависимости теплофизических характеристик (теплоёмкости, теплопроводности, плотности и коэффициента линейного расширения) от температуры.

Вместе с изменением температуры поверхности штабиков в ходе технологического процесса обработки металла давлением значительно изменяется также теплоотдача.

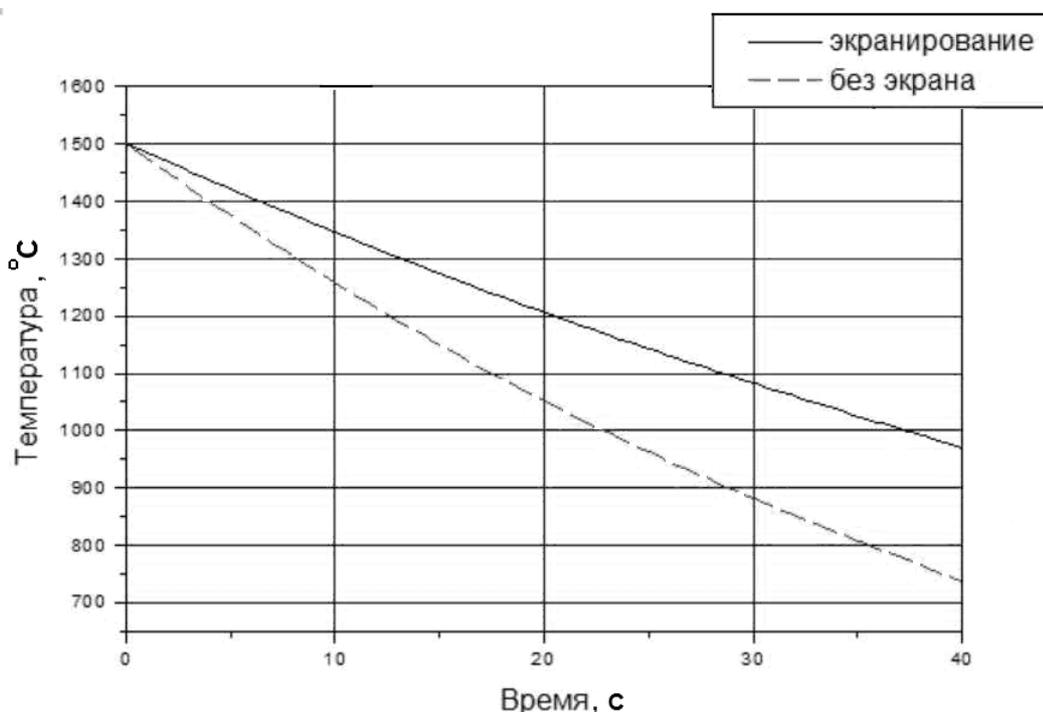


Рис. 8 – Кривые охлаждения штабика ВА сечением 10,5x10,5 мм в защитной атмосфере с использованием экранирования и без него

Расчёт суммарного коэффициента теплоотдачи, так же как и других теплофизических характеристик, осуществляли по формулам, полученным на основании статистической обработки экспериментальных данных:

для охлаждения без использования отражающего экрана (черная труба)

$$\alpha = 4.948 + 7.65 \cdot 10^{-4} \cdot t \quad (18)$$

для охлаждения с использованием теплоотражающего экрана

$$\alpha = 2.768 + 6.557 \cdot 10^{-4} \cdot t, \quad (19)$$

где t – температура поверхности металла, °C.

В результате разработан алгоритм численного решения двухмерной температурной задачи нагрева и охлаждения металла реализованный на языке C# в среде Visual Studio 2010 в виде Web-приложения ⁵.

Оценка точности расчёта температуры металла показала, что отклонение расчётных значений температуры от экспериментальных не превышает 5 % и разработанный алгоритм определения изменений температурного поля проката может быть применён в расчётах технологических процессов производства прутков из штабиков тугоплавких металлов различного сортамента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана конструкция вакуумного стана, предназначенного для винтовой прокатки прутков минимальным диаметром 5 мм из заготовок максимальным диаметральной размером 20 мм.
2. Разработан и опробован в промышленных условиях новый режим винтовой прокатки прутков диаметром 7,3 мм из штабиков марки ВА сечением 10,5x10,5 мм.
3. Усовершенствована методика и разработана в виде Web-приложения программа расчета профиля валков стана винтовой прокатки в зависимости от задаваемого профиля очага деформации.
4. Разработана 3-D модель рабочей клетки стана винтовой прокатки МАМП-10, позволившая провести анализ напряжений и деформаций, действующих в деталях в зависимости от внешних нагрузок.
5. Разработана методика оценки работоспособности цилиндрического соединения с натягом, исходя из условий прочности деталей и износостойкости контактных поверхностей и установлены зависимости допустимой величины натягов от геометрических и физико-механических характеристик материалов стального основания и твердосплавной вставки валков, предназначенных для прокатки вольфрамовых штабиков.
6. Разработана методика, алгоритм и программа для расчёта температурного поля металла при охлаждении штабиков вольфрама в вакууме с экранированием и без него, реализованная в виде Web-приложения в среде Visual Studio на языке C# и позволившая определить условия прокатки штабиков ВА сечением 10,5x10,5 мм.
7. Установлены зависимости для расчёта коэффициентов теплопроводности, теплоемкости и теплоотдачи вольфрамовых штабиков для различных условий охлаждения: с теплозащитным экранированием и без него.

⁵ Программа размещена на сайте МИСиС <http://econom.misis.ru/>

ОСНОВНЫЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

1. Туктаров Е. З. Вакуумная индукционная печь для нагрева тугоплавких металлов // *Металлургические машины и оборудование: сб. науч. трудов студентов и аспирантов МИСиС* / – М.: Изд. Дом МИСИС. 2007. С.41–43.
2. Горбатюк С.М., Каменев А. А., Туктаров Е. З., Манаков А. А. Малогабаритный вакуумный стан винтовой прокатки МАМП-10 // *Прогрессивные технологии пластической деформации.* – М.: ИРИАС, 2009. – С. 369-378.
3. Горбатюк С.М., Осадчий В.А., Туктаров Е.З. Исследование геометрических параметров винтовой прокатки с помощью системы автоматизированного проектирования Autodesk Inventor // *Металлург.* 2011. № 8. С. 32-34. **(Рекомендован ВАК)**
4. Горбатюк С.М., Туктаров Е.З., Руденский Л.А. Малогабаритный стан для высокотемпературной винтовой прокатки заготовок из тугоплавких металлов в защитных средах // *Металлург.* 2011. № 9. С. 66-69. **(Рекомендован ВАК)**
5. S. M. Gorbatyuk, V. A. Osadchii, E. Z. Tuktarov. Calculation of the geometric parameters of rotary rolling by using the automated design system Autodesk Inventor. *Metallurgist* 2011. Vol. 55, Numbers 7-8, Pages 543-546.
6. Осадчий В.А., Горбатюк С.М., Туктаров Е.З. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012610750. Расчет геометрических, кинематических и энергосиловых параметров винтовой прокатки. Заявка №20116118657 от 13.10.2011 г. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.01.2012.
7. Горбатюк С.М., Осадчий В.А., Туктаров Е.З. Разработка методики исследования геометрических параметров винтовой прокатки / *Инновационные технологии обработки металлов давлением: Сборник тезисов.* – М.: НИТУ «МИСиС», 2011. С. 100.
8. Горбатюк С.М., Осадчий В.А., Туктаров Е.З. Исследование геометрических параметров винтовой прокатки с помощью системы автоматизированного проектирования Autodesk Inventor / *Сборник докладов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением», посвященной 100-летию со дня рождения проф., д.т.н., академика АН КазССР, Героя Социалистического труда П.И. Полухина.* – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 463-466.
9. Горбатюк С.М., Туктаров Е.З., Руденский Л.А. Вакуумный стан для высокотемпературной прокатки заготовок из тугоплавких металлов / *Сборник докладов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением», посвященной 100-летию со дня рождения проф., д.т.н.,*

академика АН КазССР, Героя Социалистического труда П.И. Полухина. – М.:Изд. Дом МИСиС, 2011. 541-546.

10. Туктаров Е.З. Применение системы автоматизированного проектирования Autodesk Inventor для исследования геометрических параметров винтовой прокатки / *Металлургические машины и оборудование: сб. науч. трудов студентов и аспирантов МИСиС* / – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. с. 53-57.

11. Туктаров Е.З. Перспективная конструкция вакуумного стана для высокотемпературной прокатки заготовок из тугоплавких металлов / *Металлургические машины и оборудование: сб. науч. трудов студентов и аспирантов МИСиС* / – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. с. 57-64.

12. Туктаров Е.З., Пономаренко А.П. Анализ работоспособности цилиндрического соединения с натягом / *Металлургические машины и оборудование: сб. науч. трудов студентов и аспирантов МИСиС* / – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. с. 64-71.

13. S. M. Gorbatyuk, E. Z. Tuktarov, L. A. Rudenskii. Small mill for the high-temperature rotary rolling of semifinished products composed of refractory metals in protective media. *Metallurgist*, 2012, Volume 55, Numbers 9-10, Pages 673-674.

14. Е.З. Туктаров, Р.А, Иванов, А.В. Мартынов, Математическая модель расчёта нагрева и охлаждения пористой заготовки в вакууме / *Инжиниринг металлургического оборудования и технологий: Сб. науч. трудов студентов и аспирантов НИТУ «МИСиС»* – М.: «Металлургия», 2012. с. 54-59.