

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном
политехническом университете.

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Востров Владимир Николаевич.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Иванов Константин Михайлович,

доктор технических наук, профессор
Васильков Дмитрий Витальевич.

Ведущая организация – АО «Орско–Халиловский металлургический комбинат»
(г. Новотроицк)

Защита диссертации состоится 20 мая 2003 г.

В 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в Санкт–
Петербургском государственном политехническом университете по адресу:
195251, Санкт–Петербург, Политехническая ул., 29, лабораторно–аудиторный
корпус, кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением».

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке СПбГПУ.

Автореферат разослан 20 апреля 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор технических наук,
доцент

Востров В.Н.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕДНЫХ ГИЛЬЗ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Эффективность процесса непрерывного литья заготовок является критерием оценки технического уровня черной металлургии. Кристаллизатор – самый ответственный узел машин непрерывного литья. В кристаллизаторе формируется слиток. Он служит аппаратом для отвода теплоты при кристаллизации затвердевающего металла. От качества кристаллизатора зависит качество продукции и производительность машин непрерывного литья заготовок. Срок службы кристаллизаторов значительно меньше срока службы других сменных деталей. Отказы приводят к простоям, авариям на производстве, влияют на экологическую безопасность и безопасность труда. Наибольшее распространение получили гильзовые кристаллизаторы, основными достоинствами которых являются отсутствие стыков в стенке и менее трудоемкая технология замены кристаллизатора. Процесс изготовления отечественных кристаллизаторов характеризуется низким технологическим уровнем производства, значительным износом оборудования, большой трудоемкостью процесса, нерентабельностью, низким уровнем качества продукции и, как следствие, не конкурентоспособностью на мировом рынке. Применяемые технологии изготовления гильз кристаллизаторов недостаточно изучены и нуждаются в совершенствовании.

Этим обусловлена актуальность работы, посвященной разработке технологии изготовления гильз кристаллизаторов из меди. Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнялась в соответствии с комплексными программами № 01.200.1.19412 «Создание малого гибкого производства кристаллизаторов» и № 01.20.00.13478 «Технология конкурентоспособного производства кристаллизаторов для машин непрерывного литья заготовок».

Цель работы – разработка научно обоснованных методик расчета параметров и основ проектирования процессов изготовления медных гильз кристаллизаторов, разработка и внедрение на этой основе технологий получения гильз кристаллизаторов, обеспечивающих высокий технологический уровень, рентабельность производства, требуемое качество продукции, уменьшение трудоемкости и материалоемкости, конкурентоспособность на мировом рынке изделий металлургического машиностроения.

Методы исследования. Теоретический анализ процессов выполнен методами теории упругости, пластичности, разрушения. Статистические модели получены методами регрессионного анализа. При реализации экспериментов использовали методы твердости и микроанализа.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением математической статистики при обработке экспериментальных данных, оценкой адекватности разработанных расчетных моделей реальным процессам. Подтверждена внедрением результатов исследований в производство.

Научная новизна работы заключается в разработке научно обоснованных методик расчета параметров и проектирования технологий изготовления медных гильз кристаллизаторов, основанных на результатах теоретических и экспериментальных исследований, включающих:

- классификацию процессов объемного формообразования медных труб и методику оценки рациональности их применения методами системного анализа, на основе которых предложены новые перспективные технологические решения изготовления гильз кристаллизаторов, обеспечивающие уменьшение материалоемкости и повышение качества изделия, расширение номенклатуры изготавливаемых методами объемной штамповки медных гильз кристаллизаторов с толщиной стенки 20...25 мм и длиной до 1000 мм.

- научно обоснованную методику проектирования технологических процессов формообразования медных гильз кристаллизаторов, позволяющую на основе математических моделей процессов на стадии разработки технологии осуществить выбор технологических режимов, оборудования и инструмента, определить возможность изготовления детали и провести косвенное прогнозирование эксплуатационных характеристик формообразованных деталей.

- разработанные и реализованные в промышленном производстве технологии изготовления типовых гильз кристаллизаторов, проектируемые с применением научно обоснованных в диссертации методик расчета и рекомендаций;

- методики экспериментального исследования технологических параметров процессовковки медных труб с последующей протяжной операцией, позволяющие установить закономерности процессов, сформулировать граничные условия для анализа напряженного и деформированного состояния в очаге деформации, проверить адекватность математических моделей и построить статистические модели параметров процессов;

- методику проектирования оптимальных инструментов, заготовок, технологических режимов вытяжки ковкой медных труб, основанную на теоретическом анализе данного процесса и феноменологической теории разрушения, позволяющую получить максимально возможную величину осевой деформации трубы при отсутствии дефектов;

- методику проектирования температурных режимов печи при нагреве заготовок, обеспечившую допустимый уровень термических напряжений в заготовке, экономичность и требуемое качество поковок.

Практическая ценность и реализация работы. На основе предложенных в диссертации методик расчета и установленных закономерностей процессов изготовления медных гильз кристаллизаторов, результатов исследования параметров процессов разработаны при личном участии автора и внедрены на

ОАО «Электронно–лучевая печь» (г. Орск) новые технологии получения гильз кристаллизаторов методами горячей объемной штамповки с последующей протяжной калибровочной операцией. Внедрение новых технологий обеспечило повышение коэффициента использования металла на 20...30%, увеличение стойкости гильз в 2,0...2,5 раза, возможность изготовления гильз с толщиной стенки 15...25 мм и длиной до 1000 мм.

Новая технология имеет широкое прикладное значение и может применяться при производстве тиглей печей, дивеаторных пластин термоядерных реакторов, элементов системы охлаждения АЭС, деталей космических аппаратов и т.п.

Публикации и апробация работы. Материалы исследования опубликованы в 17 печатных трудах. Результаты работы доложены и обсуждены на международных и республиканских научно-технических конференциях в Новгороде – 1996 г., Орске – 1996 г., Пензе – 1998 г., Орске – 2000 г., Уфе – 2000 г., Оренбурге – 2000 г, Оренбурге - 2001 г., Орске – 2001 г., Оренбурге - 2002 г., Пензе – 2002 г. Работа в полном объеме обсуждена и одобрена на кафедре «Машины и технология обработки металлов давлением» Санкт–Петербургского государственного политехнического университета в 2003 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, основных выводов, списка литературы из 136 наименований и приложения. Содержит 147 страниц машинописного текста, 47 рисунков и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность, сформулирована цель и приведены основные результаты работы.

1. СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИЛЬЗ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обзор проблем производства кристаллизаторов для машин непрерывного литья заготовок показал, что срок службы кристаллизатора предопределяет себестоимость конечного продукта. Для снижения или предотвращения деформации в процессе эксплуатации и повышения износостойкости гильз кристаллизаторов целесообразно применять материалы с относительно высокой твердостью и запасом пластичности. К таким материалам относятся различные марки меди.

Рассмотрено состояние развитие теории и технологии изготовления заготовок гильзовых кристаллизаторов и отмечено, что известные технологии мало изучены, имеющиеся рекомендации не являются достаточными для разработки расчетных моделей процессов и проектирования технологий.

Анализ альтернатив решения задачи изготовления заготовок гильз кристаллизаторов показывает, что для решения этой задачи наиболее перспективными являются методы объемной штамповки с последующей протяжной калибровочной операцией, обеспечивающие по сравнению с

другими технологиями более высокую производительность, стойкость инструмента и снижение общей себестоимости изготовления. Однако, теоретических анализов и систематических экспериментальных исследований данных методов не проведено, на пути их практического освоения сделаны лишь первые шаги.

Поиск новых технических решений по совершенствованию технологии и расширению номенклатуры изготавливаемых методами объемной штамповки заготовок для гильзовых кристаллизаторов затруднен из-за отсутствия классификации.

Подход к процессам получения методами объемной штамповки заготовок гильз кристаллизаторов как к технологической системе, совершенствование которой происходит во взаимосвязи с основными направлениями работ по экономии ресурсов в машиностроении, показывает необходимость решения задачи на основе достижений и дальнейшего развития теории и технологии малоотходных процессов объемной штамповки деталей и точных заготовок. Отмечается, что большой вклад для решения задач разработки технологий изготовления заготовок гильз кристаллизаторов, имеют результаты проведенных исследований в различных аспектах объемной штамповки, выполненные отечественными и зарубежными учеными: Аксеновым Л.Б., Артесом А.Э., Бересневым Б.И., Богоявленским К.Н., Головиным В.А., Дмитриевым А.М., Евстратовым В.А., Евстифеевым В.В., Ивановым К.М., Ланским Е.Н., Лясниковым А.В., Мишуниным В.А., Навроцким Г.А., Овчинниковым А.Г., Олениным Д.Д., Паршиным В.Г., Рисом В.В., Степанским Л.Г., Фаворским В.Е., Филимоновым Ю.Ф., Lange K., Veldman C., Volkner W. и многими другими.

Значительное развитие технологии и конструкции гильзовых кристаллизаторов машин непрерывного литья получили в работах, выполненных во ВНИИМЕТМАШе, под руководством Сивака В.Б., Целикова А.А., Шифрина И.Н. и др. Большие успехи в данной области достигнуты зарубежными учеными Wimmer F., Thone H., Pavliceiers M., Gensini G., Berryman R. и др.

Благодаря выполненным работам выявлены основные условия формообразования заготовок гильз в зависимости от характера напряженно-деформированного состояния, состояния поверхности и других факторов. Предложено несколько гипотез, объясняющих механизм течения металла. На основе феноменологического подхода теории пластических деформаций металлов и экспериментальных исследований для ряда методов объемного формообразования заготовок гильз получены зависимости для определения силовых параметров процессов и прочностных характеристик изготавливаемых деталей.

Однако возникают новые задачи, связанные, в частности, с расширением номенклатуры металлов и сплавов, деформируемых малоотходными методами объемной штамповки, поиском экономичных и эффективных технологий. Не найдено оптимальное соотношение между критериями цена–качество.

В результате проведенного анализа состояния вопроса поставлены основные задачи исследования:

1. Разработка классификации процессов объемного формообразования медных труб и методики оценки рациональности их применения методами системного анализа, на основе которых предложить новые перспективные технологические решения изготовления гильз кристаллизаторов, обеспечивающих уменьшение материалоемкости и повышение качества изделия, расширение номенклатуры изготавливаемых методами объемной штамповки медных гильз кристаллизаторов с толщиной стенки 15...25 мм и длиной до 1000 мм.
2. Разработка научно обоснованной методики проектирования технологических процессов формообразования медных гильз кристаллизаторов, позволяющей на основе математических моделей процессов на стадии разработки технологии осуществить выбор технологических режимов, оборудования и инструмента, определить возможность изготовления детали и провести косвенное прогнозирование эксплуатационных характеристик формообразованных деталей.
3. Разработка и реализация в промышленном производстве технологий изготовления типовых гильз кристаллизаторов, проектируемых с применением научно обоснованных в диссертации методик расчета и рекомендаций.
4. Разработка методик экспериментального исследования технологических параметров процессов ковки медных труб с последующей протяжной операцией, позволяющих установить закономерности процессов, сформулировать граничные условия для анализа напряженного и деформированного состояния в очаге деформации, проверить адекватность математических моделей и построить статистические модели параметров процессов.
5. Разработка методик проектирования оптимальных инструментов, заготовок, технологических режимов вытяжки ковкой медных труб, основанных на теоретическом анализе данного процесса и феноменологической теории разрушения, позволяющих получить максимально возможную величину осевой деформации трубы при отсутствии дефектов.
6. Разработка методик проектирования температурных режимов печи при нагреве заготовок, обеспечивающих допустимый уровень термических напряжений в заготовке, экономичность и требуемое качество поковок.

2. РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ МЕТОДОВ ОБЪЕМНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТРУБ И ВЫБОР СПОСОБА ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ТРУБ–ЗАГОТОВОК ГИЛЬЗ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

Классификация методов изготовления труб–заготовок для гильзовых кристаллизаторов построена на основе иерархического принципа по признаку вида операции: литье, прокатка, волочение, прессование и ковка.

Анализ классификации показал, что технологический процесс объемного формообразования трубы–заготовки гильзы кристаллизатора характеризуется высокими требованиями предъявляемыми к производительности процесса, качеству и себестоимости изделия и другими показателями эффективности технологии. Задача проектирования данного техпроцесса имеет несколько решений. С точки зрения «внутренних» проблем предприятия технология формообразования трубы должна обеспечивать минимум издержек. Для потребителя оптимальным является соотношение цена–качество. Соотношение цена–качество выбираем в качестве целевой функции при выборе наилучшего способа объемного формообразования заготовки гильзы кристаллизатора.

Потребительские свойства гильзовых кристаллизаторов определяют следующие физико–механические свойства трубы–заготовки: предел текучести F_1 ; предел прочности F_2 ; относительное сужение F_3 и удлинение F_4 ; твердость F_5 ; плотность F_6 . Выбор предпочтительного варианта технологического процесса объемного формообразования трубы выполняем по комплексному критерию качества Y , построенному на основании частных критериев, характеризующих физико–механические свойства трубы:

$$Y = 0,098 F_1 + 0,087 F_2 + 0,212 F_3 + 0,063 F_4 + 0,170 F_5 + 0,370 F_6 .$$

Формальным решением многокритериальной задачи является множество Парето, в котором на основе компромисса ищется оптимальное решение.

Установлено, что эффективными являются три варианта: 1 – литье, 3 – волочение, 5 – ковка.

Показатели качества на единицу стоимости для данных вариантов имеют следующие значения:

$$W_1 = 9,2 \times 10^{-4}, \quad W_3 = 16,9 \times 10^{-4}, \quad W_5 = 21,1 \times 10^{-4} .$$

Таким образом, наилучшим методом формообразования трубы–заготовки для гильз кристаллизаторов по соотношению цена–качество является процессковки. Данный процесс положен в основу разрабатываемой технологии изготовления медных гильз кристаллизаторов.

Схема вытяжки ковкой на оправке трубы показана на рис. 1.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ВЫТЯЖКИ КОВКОЙ НА ОПРАВКЕ ЗАГОТОВОК ГИЛЬЗ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ

Математическая модель процесса объемного формообразования трубы ковкой на оправке предназначена для исследования влияния технологических параметров процесса на напряженное и деформированное состояния заготовки.

Расчетная схема и схема задания граничных условий (рис. 2) выбраны на основании экспериментов по исследованию кинематики изменения формы трубы в процессековки. На свободных поверхностях, где нет контакта заготовки с бойками и оправкой, заданы нулевые силовые условия в виде сил, действующих по нормали к поверхности: $\{P\}=0$. На контактных поверхностях задаются кинематические условия: перемещения f_z в направлении оси z , а в двух других направлениях–

проекции вектора сил трения R_T на оси x (R_{Tx}) и y (R_{Ty}). Значения проекциям R_{Tx} и R_{Ty} в первом приближении даем на основании априорной информации. После первой итерации расчета определяем величину несовпадения направления векторов $\{R_T\}$ и $\{f\}$. Корректируем соотношение проекций R_{Tx} и R_{Ty} и повторяем вычисление величины несовпадения направлений данных векторов. Процесс итерации повторяется до тех пор пока векторы $\{R_T\}$ и $\{f\}$ не станут коллинеарны.

Рис 1. Схема вытяжки трубы ковкой на оправке

Модель построена на основе деформационной теории пластичности методом конечных элементов. Модель среды является упругопластической.. При построении модели приняты допущения:

- материала однороден и изотропен в начальном состоянии;
- материал подчиняется в упругом состоянии закону Гука, условию пластичности Мизеса и соотношениям Прандтля–Рейсса в пластическом состоянии;
- процесс формообразования разбивается на этапы. Приращения и деформации на каждом этапе принимаются малыми;
- немонотонный процесс объемного формообразования трубы заменяется рядом монотонных процессов, для которых формоизменение протекает однозначно и главные оси конечной деформации сохраняют свое положение в пространстве Лагранжа;
- температурное поле в заготовке на всех этапах деформирования задается на основании экспериментальных данных.

В соответствии с методом конечных элементов определяющая система уравнений строится на основе принципа виртуальных перемещений:

$$\delta U + \delta V = 0, \quad (3.1)$$

где δU – величина запасенной энергии деформации при виртуальных перемещениях, $\delta U = \int \{\sigma\} \{\varepsilon\} dV_0$; V_0 – объем тела; δV – сумма потенциала внешних нагрузок, $\delta V = - \{\delta f\} \{R\}$; $\{\delta f\}$ – виртуальные узловые перемещения, $\{R\}$ – потенциал прикладываемых узловых сил.

Приравнявая нулю сумму потенциала внешних нагрузок и величину запасенной энергии деформации при виртуальных перемещениях, получаем систему уравнений состояния тела, которая в дискретной форме имеет вид:

$$\{P_f\} = ([K_m] \{\Delta\} - \{P_f^0\}). \quad (3.2)$$

где $\{P_f^0\}$ – вектор начальных усилий действующих на элемент; $[k_m]$ – глобальная матрица жесткости, $[K_m] = \sum_i [k_i]$; $[k_i]$ – матрица жесткости симплекс–элемента, $[k_i] = [B^T] [D^p] [B] dP_f$; $[B]$ – матрица градиентов; $[D]$ – матрица связи компонент деформаций и напряжений.

При использовании трехмерного симплекс–элемента в форме тетраэдра, интерполяционное соотношение для поля перемещений описывается выражением:

$$\{\Delta\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [N_f] \{f\} \quad (3.3)$$

где $[N_f]$ – матрица функции формы, $[N_f] = [I \ N_{fi}, I \ N_{ff}, I \ N_{fk}, I \ N_{fl}]$; I – единичная матрица; $\{f\}$ – вектор узловых перемещений, $\{f\} = f(x, y, z)$.

Уравнения связи приращений деформаций $\{d\varepsilon\}$ и перемещений:

$\{d\varepsilon\} = [B] \{\Delta\}$. Уравнения связи приращений деформаций и напряжений:

$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon\}$. Вектор нагрузки, действующей на элемент, имеет вид:

$$\{P_f^0\} = \frac{V}{4} \{P_0\} + \frac{\alpha \times V \times E}{1 - 2\mu} [B^T] \{E_1\} + \frac{S_{ijk}}{3} \{P_n\}, \quad (3.4)$$

где V – объем тетраэдра, $\{P_0\}$ – вектор объемной нагрузки, μ – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга, α – коэффициент линейного расширения, $\{E_1\}$ – единичный вектор, S_{ijk} – площадь поверхности конечного элемента, $\{P_n\}$ – вектор нагрузки нормальный к поверхности элемента. Первое слагаемое в данном выражении характеризует действие объемных сил. Второе слагаемое соответствует тепловому расширению материала. Третье отвечает поверхностной нагрузке, действующей на сторону конечного элемента.

Процесс расчета выполнялся поэтапно, начиная от исходного состояния заготовки, поскольку матрица $[K_m]$ связана с матрицей $[D]$, а матрица $[D]$ связана с текущим напряженным состоянием. В результате рассматривалась вся история нагружения и последовательно прослеживался переход элементов из упругого состояния в пластическое. Величина и направление сил трения определялись по значениям касательных напряжений и характеру течения

металла, полученных при решении задачи на предыдущем этапе. Задача решалась с использованием пакета программ *ANSYS*.

Анализ напряженного и деформированного состояния показал, что при использовании в процессековки трубы ромбических бойков в заготовке образуются зоны, где в торцевой плоскости *YZ* металл течет в нескольких направлениях. В результате затрудняется течение металла в осевом *X* направлении. В зонах раздела течения металла возможно образование трещин и других дефектов. Таким образом, наиболее перспективным для процесса вытяжки ковкой на оправке медных труб является использование вырезных бойков.

Величина максимально возможного удлинения трубы в процессековки определялась на основании оценки ресурса пластичности по методике Колмогорова В.Л., в соответствии с которой степень использования ресурса пластичности вычисляется по формуле :

$$\psi = \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\lambda_{pj}}, \quad (3.5)$$

где λ_j – степень деформации сдвига на *j*-ом этапе формообразования, λ_p – степень деформации сдвига, соответствующая моменту разрушения.

Установлено, что наибольшая допустимая величина осевой деформации, при которой в процессековки вырезными бойками в трубе не возникают дефекты, обеспечивается при соотношениях между углом охвата α вырезного бойка и наружным диаметром D_0 заготовки, показанных в виде графиков на рис. 3. Оптимальная величина относительной подачи бойков находится в интервале $0,6 < \Delta S/h_{СТ} < 1,0$. Относительное обжатие заготовки рекомендуем выбирать в пределах $0,15 < \Delta h/h_{СТ} < 0,25$. Где $h_{СТ}$ – толщина стенки заготовки. Расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями не превышает 20...25%., что доказывает адекватность построенных теоретических моделей.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕЙ ВЫТЯЖКИ НА ОПРАВКЕ МЕДНЫХ ГИЛЬЗ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ И ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ КОВАННОЙ ТРУБЫ ПРОТЯЖКОЙ, ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Исследование основных параметров процесса вытяжки трубы ковкой выполнялось на прессе КПП-800. Эксперименты по определению технологических параметров финишной операции протягивания кованой заготовки проводились на протяжном станке модели 7Б57 усилием 400 кН.

Исследование напряженного и деформированного состояний в пластически деформированной области выполнялось методом измерения твердости, разработанных Колмогоровым В.Л и Делем Г.Д. Измерение средней

твердости HB кованных труб–заготовок гильз кристаллизаторов осуществлялось прибором Полюди методом Бриннеля. При оценке распределений ε_i интенсивности деформации в кованой стенке трубы твердость измеряли методом Виккерса.

Проверка однородности дисперсий опытных данных осуществлялась по критерию Кокрена. Ошибочные опытные данные выявлялись на основании критерия Груббса. Построены уравнения регрессии для исследуемых материалов. Медь М–ЭЛП: $HB = 42 \varepsilon_i + 80,75$; Медь М1Р: $HB = 46 \varepsilon_i + 84,66$; Медь МС: $HB = 38 \varepsilon_i + 73,24$. Доверительный интервал случайной величины HB_j в каждом в j -ом опыте оценивали с вероятностью накрытия $\alpha = 0,95$. Погрешности моделей не превышают принятого допустимого значения 15% и являются удовлетворительными.

Результаты исследований распределения интенсивности деформации в кованных заготовках гильз кристаллизатора, полученные методами измерением твердости, и теоретические (глава 3) согласуются в пределах 22...28%, что доказывает достоверность теоретической модели. Адекватность математической модели подтверждается также экспериментами по определению оптимальных соотношений между углом охвата бойка α и исходным диаметров заготовки D_0 , относительным удлинением поковки $\Delta L/L_{\max}$ и относительной подачей $\Delta S/h_{\text{СТ}}$, относительным удлинением $\Delta L/L_{\max}$ и относительным обжатием $\Delta h/h_{\text{СТ}}$ заготовки. Расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями данных параметров не превышает 20...25%. Следовательно, разработанная математическая модель удовлетворительно описывает поведение технологических параметров и может быть использована при проектировании технологических процессов.

Для определения физико–механических свойств медных кованных труб–заготовок гильз кристаллизаторов проведена серия испытаний на образцах с различной степенью пластической деформации, вырезанных в продольном и поперечном направлениях из труб–заготовок. Установлены зависимости–предел пластичности σ_s , предел прочности σ_B , относительного сужения ψ , относительного удлинения δ и твердости HB от интенсивности деформации ε_i и температуры образцов.

Химический состав меди исследовался микрофотоэлектрическим спектрографом МФС–8.

Металлографические исследования труб–заготовок для гильз кристаллизатора проводились с целью выявления дефектов и изучения влияния степени пластической деформации на структуру меди. Анализ микроструктуры кованных медных труб показал: процесс горячей вытяжки ковкой на оправке оказал значительное влияние на физико-механические свойства формообразованных труб. Процессковки уменьшил размеры зерен, что способствовало повышению стойкости гильз кристаллизаторов и снижению

напряжений в зонах их концентрации в процессе эксплуатации. Твердость и прочность материала поверхности трубы повысилась на 20...30%.

Режим работы печи при нагреве заготовок для процессаковки медных заготовок гильз кристаллизаторов, применяемый в базовой технологии неэффективен, так как получается большой процент бракованных изделий, вследствие наличия в них значительных термических напряжений. По предлагаемой технологии заготовки устанавливаются в печь, предварительно нагретую до температуры $T_0 = 870...900$ К. Нагрев заготовок до температуры $T_1 = 620...650$ К осуществляется излучением печи при выключенных горелках. При температуре T_1 заготовка выдерживается определенное время и снова нагревается до температуры $T_2 = 1170...1190$ К при включенных горелках. Эффективность температурного режима оценивалась по равномерности нагрева, отсутствию трещин и экономичности (минимальное время нагрева). Отсутствие трещин контролировалось визуально. Интервал ковочной температуры измерялся пирометром частичного излучения «Смотрич 4П-05». Эксперименты показали, что предлагаемый режим нагрева заготовки обеспечивает минимальное время их нагрева и отсутствие дефектов.

Точность гильз кристаллизатора после процесса протягивания соответствует 6...9 квалитетам. Для определения режимов финишной операции протягивания гильз построена номограмма.

Рис.4. Качество поверхностного слоя гильзы после операции протягивания.

Эксплуатационные свойства поверхности гильз кристаллизаторов зависят от формы микрорельефа. Оценка опорной линии профиля в соответствии со

стандартом DIN4776 выполнялась с помощью параметров: R_{pk} – усредненная высота выступов, R_k – основа профиля, R_{vk} – усредненная глубина впадин.

Параметры профиля микрорельефа, полученные при растачивании ковanej медной трубы, следующие: $R_{pk} = 3,70$ мкм, $R_k = 9,87$ мкм, $R_{vk} = 2,88$ мкм. После процесса протягивания данные параметры принимают значения: $R_{pk} = 0,20$ мкм, $R_k = 0,17$ мкм, $R_{vk} = 0,77$ мкм. База 1 профиля и кривая Аббота 2, соответствующие микрорельефу поверхности гильзы кристаллизатора после операции протягивания, представлены на рис. 4. Поверхность имеет платообразный микрорельеф, который обеспечивает высокую износостойкость гильзы.

Исследование стойкости гильз кристаллизаторов, изготовленных по разработанной технологии, выполнены в производственных условиях на ОАО «Электронно–лучевая печь» (г. Орск). Эксперименты показали, что медные гильзы кристаллизаторов, имеют наибольшую стойкость при интенсивности деформации стенки в диапазоне 0,3...0,4. Разработанная технология повысила стойкость гильз кристаллизаторов, по сравнению с изготовленными по базовой технологии, в 2,0 ... 2,5 раза, что подтверждается соответствующими актами.

5. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕДНЫХ ГИЛЬЗ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ

Предложена на основании теоретических и экспериментальных исследований технология изготовления медных гильз кристаллизаторов, включающая отрезку заготовки от медного литого слитка на ленточной пиле, нагрев заготовки (с режимами печи показанными в главе 4), осадку ковкой по схеме квадрат–круг, прошивку отверстия, нагрев заготовки, дорнование отверстия, раздачу заготовки, нагрев заготовки, вытяжку трубы ковкой на оправке, токарную обработку, формовку прямоугольного профиля, финишную протяжную операцию. Новая технология повысила стойкость гильз в 2,0...2,5 раза и коэффициент использования металла на 20...30%. Использование литых слитков в качестве исходной заготовки, в отличие от базовой технологии, основанной применении толстостенных труб, позволило расширить номенклатуру материалов гильз кристаллизаторов (например, использовать медь М–ЭЛП), обладающих более высокими физико–механическими свойствами по сравнению с марками меди, из которых в настоящее время изготавливают трубы. Кроме того, новая технология позволяет формообразовывать гильзы большой длины (до 1000 мм) с малой толщиной стенки (15...25 мм). Гильзы кристаллизаторов по базовой технологии имеют ограничения: толщина стенки не менее 40 мм, длина гильзы не более 300 мм.

Маркетинговые исследования выполнены с целью определения условий конкурентоспособности разработанной технологии. Установлено, что гильзы кристаллизаторов, изготовленные по предлагаемой технологии, отвечают всем требованиям и конкурентоспособны на рынках Российской Федерации, СНГ, промышленно–развитых стран Запада и др. в настоящее время и в ближайшем будущем.

Разработанная технология внедрена на ОАО «Электронно–лучевая печь» (г. Орск).

6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана классификация процессов объемного формообразования медных труб и методика оценки рациональности их применения методами системного анализа, на основе которых предложены новые перспективные технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности производства гильз кристаллизаторов и улучшения их качества.
2. Разработана научно обоснованная методика проектирования технологических процессов формообразования медных гильз кристаллизаторов, позволяющая на основе математических моделей процессов на стадии разработки технологии осуществить выбор технологических режимов, оборудования и инструмента, определить возможность изготовления детали и провести косвенное прогнозирование эксплуатационных характеристик формообразованных деталей.
3. В результате разработки и реализации в промышленном производстве технологий изготовления типовых гильз кристаллизаторов, проектируемых с применением научно обоснованных в диссертации методик расчета и рекомендаций, стойкость гильз увеличена в 2,0...2,5 раза, коэффициент использования металла повышен на 20...30%, расширена номенклатура используемых материалов, увеличена длина гильз до 1000 мм при толщине стенки 15...20 мм. Фактический экономический эффект от внедрения разработанных технологий составил 0,3 млн. рублей в ценах 2003 года.
4. Разработаны методики экспериментального исследования технологических параметров процессовковки медных труб с последующей протяжной операцией, позволяющие установить закономерности процессов, сформулировать граничные условия для анализа напряженного и деформированного состояния в очаге деформации, проверить адекватность математических моделей и построить статистические модели параметров процессов.
5. Разработаны методики проектирования оптимальных инструментов, заготовок, технологических режимов вытяжки ковкой медных труб, основанных на теоретическом анализе данного процесса и феноменологической теории разрушения, позволяющие получить максимально возможную величину осевой деформации трубы при отсутствии дефектов.
6. Разработаны методики проектирования температурных режимов печи при нагреве заготовок, обеспечивающие допустимый уровень термических напряжений в заготовке, экономичность и требуемое качество поковок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Абрамова Н.Б., Соломин Л.П. Оптимизация технологии изготовления медных гильз кристаллизаторов сортовых машин непрерывного литья заготовок / Информ. листок № 50–052–00 // Оренбург: ЦНТИ, 2000. – 4 с.
2. Абрамова Н.Б., Корбут Ю.М. Определение прочности меди М – ЭЛП, полученной в печи электронно–лучевого переплава / Информ. листок № 50–064–00 // Оренбург: ЦНТИ, 2000. – 4 с.
3. Абрамова Н.Б., Корбут Ю.М. Определение температуры рекристаллизации марок меди в зависимости от способа ее производства / Информ. листок № 50–063–00 // Оренбург: ЦНТИ, 2000. – 4 с.
4. Абрамова Н.Б. Математическое моделирование геометрических параметров заготовки для гильзовых кристаллизаторов // Прочность и разрушение материалов и конструкций: Тез. докл. Российской н.–т. конф. – Орск, 2000. – С. 104.
5. Баранов В.А., Абрамова Н.Б., Ермохин Ф.К., Каманцев С.В., Пицик Н.В., Соломин Л.П. Прессование конусной гильзы кристаллизатора МНЛЗ на конусной оправке в штампе / Информационный листок № 50–001–01 // Оренбург: ЦНТИ, 2001. – 4 с.
6. Абрамова Н.Б., Бессонов А.В., Пицик Н.В. Создание производств конкурентоспособной продукции на машиностроительных заводах // Учебная, научно-производственная и инновационная деятельность высшей школы в современных условиях: Тез. докл. Международной н.–т. конф. – Оренбург, 2000. – С. 161.
7. Абрамова Н.Б., Ермохин Ф.К. Состояние непрерывной разливки стали в России и конкурентоспособность материала для кристаллизаторов // Инструмент и технологии. – № 5–6. – 2001. – С. 135–138.
8. Воронков Д.Г., Абрамова Н.Б. Выбор оптимальной формы бойков при протяжке труб. // Тез. докл. н.–т. конф. ОГТИ. – Орск, 2001. – С. 16–17.
9. Абрамова Н.Б., Пицик Н.В., Соломин Л.П. Технологияковки труб из заготовок минимального веса // Тез. докл. н.–т. конф. ОГТИ. – Орск, 2001. – С. 5.
10. Пицик Н.В., Абрамова Н.Б., Соломин Л.П., Воронков Д.Г. Технологияковки труб–заготовок из слитков М–ЭЛП / Информационный листок №50–039–01 // Оренбург: ЦНТИ, 2001. – 4с.
11. Абрамова Н.Б. Бессонов А.В., Пицик Н.В. Актуальность исследования процесса непрерывного литья заготовок // Сб. науч. трудов Перспективные технологии изготовления изделий. – Орск, 2002. – С. 31–34.
12. Липкина О.И., Пицик Н.В., Соломин Л.П., Абрамова Н.Б. Связь твердости и предела прочности холоднодеформируемых образцов из М–ЭЛП / Информационный листок № 50–039–01 // Оренбург: ЦНТИ, 2001. – 4с.
13. Абрамова Н.Б., Пицик Н.В. Маркетинговые исследования рынка кристаллизаторов // Сб. науч. трудов Перспективные технологии в машиностроении. – Орск, 2002. – С. 75–76.
14. Абрамова Н.Б. Технология изготовления конкурентоспособных стенок для кристаллизаторов МНЛЗ // Инновации в машиностроении: Тез. докл. 2–й Всероссийской н.–т. конф. – Пенза, 2002. – С. 35–37.

15. Абрамова Н.Б., Соломин Л.П. Определение внутреннего диаметра трубной заготовки под формовку для гильз кристаллизаторов сортовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) / Информационный листок № 50-051-00 // Оренбург: ЦНТИ, 2000. – 4 с.
16. Абдрашитов Р.Т., Абрамова Н.Б. Обеспечение качества промышленных изделий / Тез. докл. н.-т. конф. Современные информационные технологии в науке, образовании и практике // Оренбург, 2002. С. 24.
17. Полож. решение по заявке № 2002116285/02. Способковки медных гильз кристаллизаторов МНЛЗ / Абрамова Н.Б., 2002.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

