

УДК 620.018.45

ПРИМЕНЕНИЕ MORFOLOGИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕНТ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ**М. В. Загирняк, А. А. Шаповал, Е. А. Наумова, А. В. Литвиненко, В. В. Драгобецкий**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua**В. М. Бугайчук**

ОАО «АВМ Ампер»

ул. Красина, 6, г. Кременчуг, 39605, Украина.

А. И. Кулик

Государственное предприятие «Инженерный центр твердых сплавов «Светкермет»

ул. Комсомольская, 34, г. Светловодск, 27500, Украина.

Н. В. Высоколян

ПАО «Кременчугский вагоностроительный завод»

ул. И. Приходько, г. Кременчуг, 39621, Украина.

Г. И. Леготкин

ОАО "Кременчугский колёсный завод"

проезд Ярославский, 8, г. Кременчуг, 39611, Украина.

Дан анализ технологических процессов вибрационного волочения и плющения вольфрамовой проволоки при производстве вольфрамовых лент и катодов электронно-лучевых установок. Выбор технологических схем и процессов выполнен с использованием морфологического анализа и оптимального управления. Задача проектирования структуры материала катодов решена в рамках феноменологической теории. Оптимизация проведена по деформациям, соответствующим максимальному пределу выносливости материала катодов. Исследовано влияние схемы вибрационного волочения на механические свойства и структуру проволоки из вольфрама. При принятой схеме волочения вольфрамовая проволока характеризуется меньшим пределом прочности и более высокой характеристикой пластичности.

Ключевые слова: катод, вольфрам, волочение, плющение.**ОТРИМАННЯ MORFOLOGИЧНОГО АНАЛІЗУ ПРИ РОЗРОБЦІ ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗДОБУТТЯ СТРИЧОК ІЗ ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРІАЛІВ****М. В. Загирняк, О. О. Шаповал, О. О. Наумова, О. В. Литвиненко, В. В. Драгобецкий**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua**В. М. Бугайчук**

ВАТ «АВМ Ампер»

вул. Красина, 6, м. Кременчук, 39605, Україна.

А. І. Кулик

Державне підприємство «Інженерний центр твердих сплавів «Світкермет»

вул. Комсомольська, 34, м. Светловодськ, 27500, Україна.

М. В. Высоколян

ВАТ «Кременчуцький вагонобудівний завод»

вул. І. Приходько, м. Кременчук, 39621, Україна.

Г. І. Леготкін

ВАТ "Кременчуцький колісний завод"

прізд Ярославський, 8, м. Кременчук, 39611, Україна.

Надано аналіз технологічних процесів вібраційного волочіння і плющення вольфрамового дроту при виробництві вольфрамових стрічок і катодів електронно-променевої установок. Вибір технологічних схем і процесів виконано із використанням морфологічного аналізу і оптимального управління. Завдання проектування структури матеріалу катодів вирішено в рамках феноменологічної теорії. Оптимізація проведена за деформаціями, відповідними максимальній межі витривалості матеріалу катодів. Досліджено вплив схеми вібраційного волочіння на механічні властивості і структуру дроту із вольфраму. При прийнятій схемі волочіння вольфрамовий дріт характеризується меншою межею міцності і вищою характеристикою пластичності.

Ключові слова: катод, вольфрам, волочіння, плющення.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Ленты из тугоплавких металлов широко используют в электротехнической и электронной промышленности для изготовления катодов электронных пушек печей электронно-лучевой плавки. Действующие технологии производства лент, как правило, включают комплекс операций получения испеченных штабиков круглой

заготовки и ее плющение прокаткой на стане или волочением через роликовые волокна [1]. Однако большинство освоенных технологий не обеспечивают необходимой производительности, формирование оптимальной структуры и механических свойств вольфрама.

Одним из главных препятствий для расширения сферы применения, как вольфрама, так и его сплавов, является малая пластичность этих материалов при пониженных температурах, что приводит к снижению сопротивления ударным нагрузкам и затрудняет обработку давлением. Низкотемпературная хрупкость, недостаточный уровень жаропрочности характерны не только для вольфрама, но и для ряда других металлов с объемной центрированной кубической решеткой и их сплавов, накладывают на процесс пластической деформации этих материалов существенные ограничения и особенности. Высокая температура рекристаллизации, наличие в металлах технической чистоты температурных зон хрупкости и повышенная реакционная способность ограничивают возможность процессов обработки давлением тугоплавких металлов. Поэтому определения режимов процессов обработки давлением с учетом исходных свойств заготовок и особенностями конкретного процесса обработки металлов давлением (ОМД) и требованиями к эксплуатационным свойствам готовых изделий.

Комплекс технологий обработки давлений при изготовлении вольфрамовых катодов направлен на повышение их эксплуатационных свойств, т.е. нацелен на проектирование и создание структуры материала, в которой формируются и создание области замыкания или непроходимости трещин. Для обоснованного выбора составляющих технологий пластического деформирования возникает необходимость сведения задач механики пластического деформирования к задачам математическим. Основными методами подхода к исследованию поведения пластически деформируемых сред являются статистический метод и феноменологическая теория. В статистическом методе применяется вероятностный подход к изучаемым явлениям, и вводятся средние по большому ансамблю частиц характеристики. Феноменологическая теория основана на общих, добытых из опыта закономерностях и гипотезах.

Сложность процесса упругопластического деформирования и разрушения твердых тел, недостаточно удовлетворительное теоретическое объяснение структурных изменений материала, возникающее при этом, вызывают необходимость уточнения, прогнозирования результатов и выдвижения новых концепций, реально описывающих реальные процессы структурообразования. Поэтому в настоящее время интенсивно разрабатываются и исследуются иерархические и синергетические механизмы пластического деформирования и разрушения. Несмотря на огромные достижения статистических методов, некоторые объекты конденсированного тела, характеризующиеся индивидуальным поведением, не могут быть описаны набором параметров, определяющих законы взаимодействия этих объектов. Альтернативу статистическому подходу составляет общая теория систем [2]. В основу этого подхода положено математическое определение системы как отношения, заданного на входном и выходном объектах системы, в качестве которых обычно высту-

пают некоторые заданные множества. Теория систем не требует введение статистических ансамблей для объединения многовариантности поведения систем.

Однако ряд задач пластического деформирования, направленных на создание определенной структуры материала можно решить в рамках феноменологической теории с применением методом оптимизации. В данном случае возникает необходимость использования количественно-оптимизационных моделей, позволяющих дать количественные рекомендации по выбору параметров $F_i^{(p)}$ в связи с решением задачи оптимизации структуры материала для последующей операции пластического деформирования и в конечном итоге для получения термостойкой структуры материала катодов.

В некоторой степени теория систем перекликается с оптимизационными технико-экономическими задачами, которые сводятся к определению экстремальных значений некоторых параметров отклика и величин соответствующих им определяющих параметров.

В настоящее время разработан значительный арсенал принятия технических и технологических решений: использование иерархического функционального классификатора (ИФК) [1], метод анализа функциональных связей, метод Парето, метод морфологического анализа, построение сценария, построение дерева целей, метод QUEST [1].

Например, с помощью ИФК увязывают в единую систему основные проблемы прогнозируемой технологии производства вольфрамовых лент и катодов. Для достижения окончательной цели (y_p) – получение вольфрамовых катодов с максимальным сроком эксплуатации – необходимо установить промежуточные цели (y_i). Порядок достижения y_n , определяется длиной пути $y_1 \rightarrow y_2 \rightarrow \dots \rightarrow y_i \rightarrow \dots \rightarrow y_p$. С целью описания технологических процессов, характеризующихся качественными целями, необходимо подробное описание – как исходного решения y_i , так и промежуточных целей y_i . В этом случае в классификаторе необходимо, помимо соблюдения иерархии уровней в достижении главной цели, предусмотреть иерархию подуровней, обеспечивающих решение промежуточных задач:

$$y_1(y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1j}) \rightarrow y_2(y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2k}) \rightarrow \dots \\ \dots \rightarrow y_m(y_{m1}, y_{m2}, \dots, y_{mn}) \rightarrow \dots \rightarrow y_p$$

где y_{ij} – j -й подуровень i -го этапа.

Для формирования тактов причинно-следственных связей необходимо классификатор ИФК дополнить методом анализа функциональных связей.

В целом совершенствование процессов обработки давлением для производства изделий из вольфрама сулит огромными экономическими дивидендами для основных отраслей промышленности Украины. Особенно эффективно и актуально примене-

ние вольфрамовых изделий в машиностроении, металлургии и горнодобывающей промышленности.

Цель работы – формирование возможных вариантов технологий производства вольфрамовых катодов с использованием эвристических методов прогнозирования с выбором критериев оценки пластичности заготовок на операциях, предшествующих плющению и максимальной термочности при плющении.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Для описания комплекса технологических процессов, который качественными показателями, более нагляден морфологический классификатор [1]. На первом этапе выделяем наиболее важные аспекты проблемы, которые выступают в качестве оснований деления P_i . Затем для каждого i -го аспекта выявляются возможные варианты решения V_j^i . Вся совокупность аспектов проблемы и способов ее решения может быть представлена в виде системы матриц, называемых «морфологическим ящиком» (рис. 1).

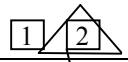
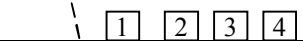
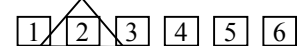
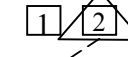
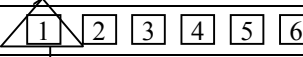
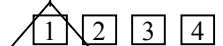
Аспекты проблемы производства вольфрамовых катодов	P_i	Варианты решения V_j^i
Получение заготовок	P_1	
Метод плавки	P_1^1	
Методы порошковой металлургии	P_1^2	
Заготовка для последующей обработки давлением	P_2	
Волочение	P_3	
Плющение	P_4	

Рисунок 1 – Система матриц «морфологического ящика» при производстве вольфрамовых катодов

Можно выделить шесть основных аспектов P_i , характеризующих развитие технологии изготовления вольфрамовых катодов. Если в рамках этого аспекта имеются подаспекты, используем дополнительный индекс. Для каждого из этих аспектов можно найти варианты решений V_j^i . Так, компактные заготовки из вольфрама для последующей обработки давлением P_1 производят методом: V_1^1 – вакуумная плавка; V_2^1 – порошковая металлургия.

Методы плавки P_1^1 , в свою очередь, могут быть: V_1^{11} – индукционная, V_2^{11} – электродуговая, V_3^{11} – электронно-лучевая, V_4^{11} – плазменная.

Методы порошковой металлургии P_1^2 : V_1^{12} – гидростатическое прессование в вакууме; V_2^{12} – прессование в среде водорода; V_3^{12} – гидростатическое прессование в вакууме с модифицирующим воздействием на спекаемый порошок; V_4^{12} – горячим износостойким прессованием в вакууме; V_5^{12} – горячим изостатическим прессование в среде водорода с модифицирующим воздействием на спекаемый порошок; V_6^{12} – горячим изостатическим прессованием в вакууме с модифицирующим воздействием на спекаемый порошок.

Исходная заготовка для последующей обработки давлением P_2 поставляется в виде: V_1^2 – штабик, прокатанный на пруток; V_2^2 – винтокатанный пруток.

Винтокатанные прутки подвергают термоциклическому отжигу и деформированного методом бесконтейнерного прессования. Учитывая, что эти процессы достаточно апробированы и оптимальные параметры и режимы обработки определены, возможные варианты этих процессов рассматривать не будем. В результате этих операций, благодаря всестороннему сжатию в очаге деформации, пластичность заготовки возрастает, достигая уровня, достаточного для обработки вольфрама волочением.

Варианты технологии волочения V_3^2 – волочение с применением вращательных, угловых и поперечных колебаний волоки; V_3^3 – волочение с вибрацией проволоки; V_3^4 волочение с применением продольных колебаний; V_3^5 – ступенчатое вибрационное волочение; V_3^6 – волочение через роликовые волоки.

Плющение ленты из круглой заготовки производится на плющильных станах. Возможные варианты последних включают P_4 : V_4^1 – нереверсивные двухвалковые станы; V_4^2 – трехвалковые станы со средним волоком меньшего диаметра; V_4^3 – трехвалковые станы со всеми приводными валками одинакового диаметра; V_4^4 – реверсивные двухвалковые станы; V_4^5 – четырехвалковые реверсивные станы. Необходимости расчленения прокатки на две операции путем последовательной установки двух или большего количества станов, как показал производственный опыт, нет.

Количественный анализ представленной модели показывает наличие 2x4x6x2x7x4 различных вариантов технологий производства вольфрамовых лент для катодов. Все из них практически осуществимы.

Для установления функциональных связей, влияющих на длительность эксплуатации вольфрамовых катодов, необходимо отразить способность последних выдерживать тепловые стационарные потоки.

Создание термостойких катодов для высокотемпературных печных нагревателей может быть осуществлено на основе компромисса и оптимизации значений критериев максимальных напряжений, энергетических критериев с учетом микропластичности.

Оптимизировать в целом работоспособность вольфрамовых катодов необходимо по комбинации физико-механических свойств (прочности и модуля упругости) с учетом предпочтительности материалов с малым коэффициентом термического расширения и высокой теплопроводностью.

Получение полуфабрикатов штабиков с использованием операций ротационнойковки удовлетворяют требованиям технических условий регламентированных по химическому составу, геометрическим размерам и состоянию поверхности. Однако значительная часть штабиков разрушается на операцияхковки и при волочении. Поэтому, это привело к необходимости изучения характеристик, не входящих в ТУ, и поиска альтернативной технологии, исключающих образование трещин, возникающих при ротационнойковке [3].

Структура характеризуется пористостью, формой фазовых составляющих и размеров пор, фазового состава, величины зерна и др. Было предложено оценивать однородность микроструктуры, наличие микротрещин. Пористость снижает прочность и теплопроводность и может как способствовать зарождению и распространению трещин, так и задерживать их распространение. Форма, размерность распределения пор вызывает чрезвычайно многообразный характер влияния пористости на термостойкость.

Предложенный процесс винтовой прокатки, хотя и неоднозначно, влияет на качество изделий из полуфабрикатов, но исключает брак по обрыву и расслоению проволоки. Винтовая прокатка, как и пористость, возникающая при спекании вольфрамовых штабиков, неоднозначно влияет на термостойкость изделий. Винтовая прокатка с одной стороны приводит к образованию плен и трещин на поверхности проката, но с другой стороны образование структуры в виде волокон, закрученных по винтовой линии относительно оси проката, препятствует расслоению металла на дальнейших операциях обработки давлением.

Возможно, термостойкость непосредственно зависит от трещиностойкости (ударной вязкости). Формально критерий максимальных термических R_2 (Вт/м^2) напряжений и энергетический критерий оценки термостойкости зависит от K_c – коэффициента интенсивности напряжений, т.е.

$$R_1 = \frac{K_c(1-\mu)}{\alpha_m E(\pi L)^{0,5}}; \quad (1)$$

$$R_3 = \frac{E\pi L}{K_c^2(1-\mu)} \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона; L – критическая длина трещины; E – модуль упругости;

$$K_c = Y\sigma(L)^{0,5},$$

где Y – геометрический коэффициент.

Из соотношений (1) и (2) следует, что, как и для прочности, и зависимость термостойкости от трещиностойкости неоднозначна. Кроме того, в работе [3] показано, что значительное увеличение K_c в 2–3 раза практически не сказывается на термостойкости.

Помимо описанных характеристик материала, которые не позволяют прогнозировать эксплуатационную долговечность вольфрамовых катодов, можно обратить внимание на показатели циклической стойкости. Установлено, что технологическая последовательность, связанная с процессами пластического деформирования, существенно влияет на предел выносливости обработанной детали [4]. Причем приращение предела выносливости будет наибольшим при оптимальной ε_{iopr} интенсивности деформаций.

В настоящее время установлено то, что макроскопическим проявлением в процессе деформирования является локализация деформаций, которая завершает стадию однородного пластического течения [2]. При этом до начала локализации в полосах сдвига, шейках отрыва и других макроскопических проявлениях реализуется как минимум две моды деформации [2]. С ростом интенсивности деформаций происходит как увеличение степени физического упрочнения материала, так и усугубление процесса разупрочнения. Помимо этого наиболее интенсивный рост количества и размеров микродефектов наблюдается за пределами равномерной деформации. Таким образом, оптимальной интенсивностью деформаций должна быть равномерная деформация – $\varepsilon_p = \varepsilon_{iopr}$. Приближенные, но достаточно точные значения ε_p , определяются из простых зависимостей, приведенных в работе [4]. В качестве пластической твердости вольфрама следует брать ее значения, соответствующие температуре пластического деформирования.

Определив значение ε_p для вольфрама по зависимости

$$HD = f(HV) \text{ и } \varepsilon_p = f(HD),$$

где HD – пластическая твердость; HV – твердость по Викерсу, определяем значения оптимальных параметров плющения вольфрамовой проволоки, которые обеспечивают максимальные значения предела выносливости, термостойкости и оптимальную монокристалличность.

На операциях, предшествующих плющению, необходимо добиться максимальной пластичности материала заготовки. Выбор в качестве меры пла-

стичности накопленную до момента разрушения пластическую деформацию или равномерную деформацию не является оптимальным [5]. Физически более обоснованным является выбор в качестве меры пластичности работы пластической деформации [5]. Практически, для характеристики напряженного состояния и оценки его влияния и на энергетические затраты, целесообразно использовать инвариантные характеристики. Последние позволяют исследовать траектории нагружения в пространстве инвариантов. Наиболее эффективно количественную оценку пластичности металлов производить по критерию В.А. Огородникова [5].

$$\chi = (\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3)^{0.5} \cdot \sigma_u^{-1}, \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; σ_u – интенсивность напряжений.

Показатель χ удобно использовать для оценки объемности напряженного состояния [5], которое обеспечивает максимальную пластичность материала деформируемой заготовки.

Сопоставление показателей χ процессовковки и винтовой прокатки; различных схем прессования, процессов волочения и плющения ленты показало, что наибольшими показателями χ обладают процессы винтовой прокатки, циклического бесконтейнерного прессования, волочения через неподвижную волоку и плющения ленты на стане Дуо.

Величина восстановления запаса пластичности после циклического отжига определялась по методике В.А. Огородникова [5] по зависимости

$$\Delta\psi_1 = \psi_1 + \sum_{i=2}^n \psi_i - 1, \quad (4)$$

где ψ_1 – использованный ресурс пластичности без отжига; $\Delta\psi_1$ – величина восстановленного запаса пластичности после отжига; ψ_i – использо-

ванный ресурс пластичности после i -го цикла отжига; $i = 2, 3, \dots, n$.

ВЫВОДЫ. В результате морфологического анализа возможных вариантов технологий обработки разработана морфологическая таблица, включающая 2688 вариантов технологий.

Параметр, по которому производится оптимизация процесса плющения, является значением граничной равномерной интенсивности деформаций. Эффективность процессов пластического деформирования, предшествующих плющению, оценивалось по критерию В.А. Огородникова. Это позволило в рамках феноменологической теории установить набор технологий получения вольфрамовых катодов из винтокатанных прутков – термоциклический отжиг, бесконтейнерное циклическое прессование, волочение через неподвижную матрицу и плющение на стане Дуо.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы прогнозирования развития конструкционных материалов / Л.С. Ерохина, Л.В. Калугина, С.К. Михайлов. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1980. – 256 с.
2. Миклашевич И.А. Микромеханика разрушения в обобщенных пространствах. – Минск: «Логвинов», 2003. – 195 с.
3. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена / А.Н. Шаповал, С.М. Горбатюк, А.А. Шаповал. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2006. – 352 с.
4. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
5. Энергия. Деформации. Разрушение: монография / В.А. Огородников, В.Б. Киселев, И.О. Сивак. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.

APPLICATION OF MORPHOLOGICAL ANALYSIS AT DEVELOPMENT OF OPTIMUM TECHNOLOGY OF MANUFACTURING RIBBONS FROM REFRACTORY MATERIALS

M. Zagirnyak, A. Shapoval, E. Naumova, A. Litvinenko, V. Dragobetskiy

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pervomayskaya, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

V. Bugaychuk

ABM Amper, JSC
vul. Krasins, 6, Kremenchuk, 39600, Ukraine.

A. Kulik

State Enterprise “Engineering centre of firm alloys “Svetkermet”
vul. Komsomol, 34, Svetlovodsk, 27500, Ukraine.

N. Visokolyan

Kryukovsky Railway Car Building Works, PLG
vul. I.Prihodko, Kremenchuk, 39621, Ukraine.

G. Legotkin

Kremenchuk Wheel Plant, JSC
pr. Yaroslavskiy, 8, Kremenchuk, 39611, Ukraine.

In the paper, the analysis of technological processes of the vibratory drawing and flattening of tungsten wire is given at the manufacturing of tungsten ribbons and cathodes of the electron-beam apparatus. The flowsheets and operation

processes were selected using the morphological analysis and optimum control. The authors have solved the problem of planning of the cathodes material structure within the framework of the phenomenological theory. The optimization was conducted according to the deformations corresponding to the maximal limit of endurance of the cathodes material. The influence of the vibratory drawing scheme on the mechanical properties and structure of the tungsten wire is investigated. For the chosen scheme of drawing the tungsten wire is characterized by a lower tensile strength and higher plasticity.

Key words: cathode, tungsten, drawing, flattening.

REFERENCES

1. Yerokhina, L.S., Kalugina, L.V., Michailov, S.K. (1980), *Metody prognozirovaniya i razvitiya konstruktsionnykh materialov* [Methods of forecasting development of constructional materials], Mashinostroenie, St.-Petersburg, Russia.
2. Miklashevich, I.A. (2003), *Mikromekhanika i razrusheniya v obobshchennykh prostranstvakh* [Micromechanics of fracture in generalized spaces], Logvinov, Minsk, Belarus.
3. Shapoval, A.N., Gorbatyk, S.M., Shapoval, A.A. (2006), *Intensivnye protsessy obrabotki davleniem volframa i molibdena* [Intensive processes of pressworking of tungsten and molybdenum], Publishing house "Ruda i Metally", Moscow, Russia.
4. Drozd, M., Matlin, M., Sidyakin, U. (1986), *Inzhenernye raschety uprugoplasticheskoi kontaktnoi deformatsii* [Engineering calculations of elastic-plastic contact deformation], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
5. Ogorodnikov, V.A., Kiseliov, V.B., Sivak, I.O. (2005), *Energiya. Deformatsiya. Razrushenie* [Energy. Deformation. Failure], monograph, UNIVERSUM, Vinnitsa, Ukraine.

Стаття надійшла 29.12.2013.