



УДК 620.018.45

В.В. Драгобецкий, А.А. Шаповал, Д.В. Мосьпан
Кременчугский национальный университет
имени Михаила Остроградского
г. Кременчуг, Украина
E-mail: tungsten@yandex.ru
Дата поступления 02.03.2015

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛЕНТ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация

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, лента, вольфрам, волочение, плющение, структура.

Введение

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 спеченных штабиков, круглой заготовки и ее плющение прокаткой на стане или волочением через роликовые волокни [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 и 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 определение 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 давлением при изготовлении вольфрамовых катодов направлен на повышение их эксплуатационных свойств, т.е. нацелен на проектирование и создание структуры материала, в которой формируются и создаются 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 ис-

следованию 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 выступают 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 термопрочной 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.

Цель исследования. Формирование возможных вариантов технологий производства вольфрамовых катодов с исполь-

зованием эвристических методов прогнозирования с выбором критериев оценки пластичности заготовок на операциях, предшествующих плющению и максимальной термостойкости при плющении.

Основная часть

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» (рисунок 1).

Можно выделить 6 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.

Аспекты проблемы производства лент из тугоплавких металлов	P_i	Варианты решения y_i^j
Получение заготовок	P_1	
Метод плавки	P_1^1	
Методы порошковой металлургии	P_1^2	
Заготовка для последующей обработки	P_2	
Волочение	P_3	
Плющение	P_4	

Рисунок 1. Система матриц «морфологического ящика» при производстве лент из тугоплавких металлов

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 прессованием 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, прокованный на прутки; V_2^2 – винтокатанный прутки.

Винтокатанные прутки подвергаются термоциклическому отжигу и деформированию методом бесконтейнерного циклического 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 станках. Возможные варианты последних включают P_4 : V_4^1 – нереверсивные двухвалковые станы; V_4^2 – трехвалковые станы со средним валком 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 $2 \times 4 \times 6 \times 2 \times 7 \times 4$ 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 по наличию микротрещин. Пористость снижает прочность и теплопроводность. Может, как

способствовать зарождению и распространению трещин, так и задерживать их распространение. Форма, размерность распределения пор вызывает чрезвычайно многообразный характер влияния пористости на термopрочность.

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 термopрочность 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, термopрочность непосредственно зависит от трещиностойкости (ударной вязкости). Формально критерий максимальных термических R_2 (Вт/м^2) напряжений и энергетический критерий оценки термopрочности 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), (2) следует, что, как и для прочности и зависимость термopрочности от трещиностойкости неоднозначна. Кроме того, в работе [4] показано, что значительное увеличение K_c в 2-3 раза практически не сказывается на термopрочности.

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 [5]. Причем приращение предела выносливости будет наибольшим при оптимальной ε_p интенсивности деформаций.

В настоящее время установлено то, что макроскопическим проявлением в процессе деформирования является локализация деформаций, которая завершает стадию однородного пластического течения [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 – $\varepsilon_p = \varepsilon_{iopt}$. Приближенные, но достаточно точные значения ε_p определяются из простых зависимостей, приведенных в работе [5]. В качестве пластической твердости вольфрама следует брать ее значения, соответствующие температуре пластического деформирования.

Определив значение ε_p для вольфрама по зависимости $НД = f(HV)$ и $\varepsilon_p = f(НД)$, где $НД$ – пластическая твердость; HV – твердость по Викерсу, определяем значения оптимальных параметров плущения вольфрамовой проволоки, которые обеспечивают максимальные значения предела выносливости, термopрочности и оптимальную монокристалльность.

На операциях, предшествующих плущению, необходимо добиться максимальной пластичности материала заготовки. Выбор в качестве меры пластичности, накопленной до момента разрушения пластическую деформацию или равномерную деформацию не является оптимальным [6]. Физически более обоснованным есть выбор в качестве меры пластичности, работы пластической деформации [6]. Практиче-

ски 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 [6]:

$$\chi = (\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3)^{0,5} \cdot \sigma_u^{-1} \quad (3)$$

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

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

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 по зависимости [6]:

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

где ψ_1 – использованный ресурс пластичности без отжига; $\Delta\psi_1$ – величина восстановленного запаса пластичности после отжига; ψ_i – использованный ресурс пластичности после i -го цикла отжига; $i = 2, 3 \dots n$.

Заключение

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

Параметром, по которому производится оптимизация процесса плющения, является значение граничной равномерной

интенсивности деформаций. Эффективность процессов пластического деформирования предшествующих плющению оценивалась по критерию В.А. Огородникова. Это позволило в рамках феноменологической теории установить набор технологий получения вольфрамовых катодов из винтокатаных прутков – термоциклический отжиг, бесконтейнерное циклическое прессование, волочение через неподвижную матрицу и плющение на стане Дуо.

Библиографический список

1. Ерохина Л. С., Калугина Л. В., Михайлов С. К. Методы прогнозирования развития конструкционных материалов - Л.: Машиностроение. Ленинградское отд.е, 1980. – 256 с.
2. Миклашевич И. А. Микромеханика разрушения в обобщенных пространствах – Минск, «Логвинов», 2003.- 195 с.
3. Shapoval A.N. Improving the technology for making tungsten wire / Shapoval, A.N.; Gorbatyuk, S.M.; Gorbatyuk, M.S. // Metallurgist Volume: 42 Issue: 9-10 Pages: 392-395
4. Шаповал А. Н., Горбатюк С. М., Шаповал А. А. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2006. – 352 с.
5. Дрозд М. С., Матлин М. М., Сидякин Ю. И. Инженерные расчеты упруго-пластической контактной деформации. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
6. Огородников В. А., Киселев В. Б., Сивак И. О. Энергия. Деформации. Разрушение. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.