

М. А. Кардаполова, О. Г. Девойно, Е. В. Суханова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МНОГОКРАТНОГО ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ "ARSANAL"

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Рентгеноструктурный анализ (РСА), являющийся основой для исследования структуры металлов и сплавов, также позволяет определять внутренние напряжения, размеры и предпочтительную ориентацию кристаллов, а также структурные несовершенства в кристаллах, присутствие которых определяет многие их свойства. С помощью РСА можно установить влияние технологических параметров обработки на структуру и свойства сплавов, что дает возможность управлять комплексом свойств и в итоге выявить пути повышения эксплуатационных характеристик сплавов.

Однако исследование с помощью традиционной методики весьма сложно и трудоемко (особенно при исследовании сложных композиционных покрытий, например, при изучении покрытий, оплавленных лазерным излучением). Недостатки традиционной методики фазового РСА: в качестве данных для сравнения необходимо использовать картотеку; данные картотеки неполны (т.е. эталонные снимки содержат не все возможные линии), т.к. картотека образована на основании литературных публикаций, результаты которых получены в самых разнообразных, не стандартизованных условиях; сама картотека громоздка; поиск в ней немногим менее трудоёмок, чем сама расшифровка.

Существующие программы-расшифровщики работают в автоматическом режиме (т.е. без участия человека), без учета знаний материаловедения и опыта самого исследователя, что не всегда корректно, так как программа может выполнить поиск не существующих (применительно к данным условиям) элементов, так как имеется ряд соединений с одинаковыми параметрами решеток.

Для упрощения обработки результатов рентгеноструктурного анализа многофазных металлических и неметаллических систем, содержащих твёрдые растворы и химические соединения, авторами был разработан пакет прикладных программ (ППП) "ARSANAL". Пакет рекомендуется к применению при исследовании результатов термической, химико-термической, лазерной обработки металлов и сплавов, обработки давлением, нанесения гальванических, плазменных и других покрытий.

В данной работе показано применение пакета прикладных программ "ARSANAL" при анализе покрытий, формируемых при многократном лазерном легировании.

Методика исследований. Для реализации процессов лазерного легирования использовали технологические установки на базе лазеров непрерывного действия "ЛГН-702" и "Комета-2". В экспериментах на образцах из стали 45 применяли два легирующих состава: смесь равных объемов бора и карбидов хрома В + Cr₇C₃, Cr₃C₂ (лазерное борохромирование) и смесь равных объемов бора и карбида бора В + В₄С (лазерное борирование). Толщина слоя обмазки составляла 0.09-0.11 мм и контролировалась толщиномером МТ-40НЦ. Рассматривались различные технологические варианты легирования (табл. 1).

Таблица 1. Технологические варианты обработки многократным ЛЛ

Номер варианта	Вид обработки во время прохода			Скорость прохода, мм/мин		
	I	II	III	I	II	III
1	ЛЛ	-	-	200	-	-
2	ЛЛ	ЛЗ	-	200	400	-
3	ЛЛ	ЛЛ	-	200	400	-
4	ЛЛ	ЛЛ	-	200	900	-
5	ЛЛ	ЛЛ	ЛЛ	200	400	900

Примечание: I, II, III - номера проходов; ЛЛ - лазерное легирование; ЛЗ - лазерная закалка.

Рентгеноструктурные исследования проводили с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3.0 с медным анодом и монохроматором, что обеспечивает получение на снимках максимального числа альфа-линий.

Режим съёмок для проведения качественного и количественного фазового анализа: непрерывная съёмка при угловой скорости счётчика 1 или 2 град/мин в интервале углов "ТЭТА" от 10 до 75 градусов. Режим съёмки для определения микроискажений (остаточных напряжений 2 рода) и размера блоков когерентного рассеяния : непрерывная съёмка с угловой скоростью не более 1/8 град/мин, при углах "ТЭТА" не менее 50 градусов. Выбор данных углов обусловлен тем, что на задних углах точнее производится расчет параметров решетки.

Задача фазового РСА решается сравнением опытного снимка с эталонными снимками фаз, наличие которых в образце предполагает исследователь. Источник информации для фазового анализа, определения составов фаз - обмер снимков с составлением таблицы, содержащей номера линий, углы отражения "Θ" и интенсивности линий (в простейшем случае - высоты пиков).

В ППП "ARSANAL" количество фаз в образце рассчитывается по сумме интенсивностей линий данной фазы относительно суммарной интенсивности пиков опытного снимка. При этом случаи (весьма частые) наложения линий при расшифровке в программах учтены, и доля каждой фазы при совпадении рассчитывается, соответственно, по табличной интенсивности линии эталонного снимка. Количество фаз, образование которых возможно в системе с известным элементным составом, ограничено и определяется в первом приближении

соответствующими бинарными диаграммами состояния. Случаи образования тройных и более сложных соединений, как показывает опыт авторов, также редки.

Таким образом, если исключить случаи весьма высоких требований к точности данных об интенсивности линий (например, при анализе текстуры), во всех прочих случаях фазовый РСА оказывается вполне достоверным при использовании эталонов, полученных расчетным путем.

Сценарий расшифровки фазового состава включает следующие данные [1]:

- наименования искомым фаз (элементов и соединений);
- последовательность поиска фаз (рекомендуется вести поиск, начиная с фаз, вероятность образования которых в данном сплаве наименьшая);
- ширина окна (величина допустимого отклонения линий опытного снимка от эталонных данных).

Как правило, сценарий формируется исследователем на основании его опыта и имеющихся данных о химической природе анализируемой системы и взаимодействиях компонентов в ней.

Эталонный рентгеновский снимок вещества любой сингонии (до триклинной включительно) рассчитывается по химической формуле и полиморфной модификации, заданной пользователем, с использованием кристаллохимических данных.

С помощью пакета ПП «ARSANAL» расшифровывают снимки по требуемому сценарию, используя в качестве исходных данных файлы опытных и файлы эталонных снимков. Результат работы программ - краткая таблица расшифровки, содержащая число совпавших линий для каждой искомой фазы и приблизительное количество фазы (в %% от площади облучённой поверхности с точностью не более +/- 5..7 %).

Расчет параметров решёток - алгоритмически простая, но весьма трудоёмкая задача, к решению которой при традиционной методике РСА прибегают не часто по следующим причинам: считается возможным использовать только метод съёмки по точкам линий с большими углами "Θ", с последующим определением угла по центру тяжести линии; если для кубических структур необходимо определить положение одной линии, то для низкосимметричных структур их требуется до 4..6, что оказывается практически невозможным из-за слабой интенсивности "задних" линий и высокой вероятности наложения линий различных фаз; после получения необходимого числа углов отражения "Θ" необходимо составить и решить систему уравнений, число которых равно числу искомым параметров решётки.

Используя эту методику (весьма, к тому же, неточную из-за многочисленных преобразований исходной информации), упускают из вида, что рентгеновский снимок, полученный непрерывной съёмкой, уже содержит всю информацию, необходимую для расчёта параметров кристаллических решёток всех

фаз, обнаруженных фазовым PCA на снимке. Эта задача решается ППП «AR-SANAL», обладающим следующими преимуществами:

- расчёт всех параметров решётки (от 1 в кубических структурах до 6 в триклинной) производится для каждой линии данной фазы, т.е. обеспечивается максимальная полнота извлечения информации;

- для всего снимка параметры рассчитываются методами экстраполяции и усреднения, что позволяет пользователю выбрать оптимальный результат.

ППП «ARSANAL» позволяет рассчитывать химические составы твердых растворов, образующихся на основе фаз, обнаруженных при фазовом анализе. Программа использует правило Вегарда о прямой пропорциональности периодов решетки вещества концентрации примеси в твердом растворе (применимо главным образом для кубических структур) или правило Зена, аналогичное по смыслу правилу Вегарда, но для объемов кристаллических ячеек (применимо для структур с симметрией ниже кубической) [2]. Исходными данными для расчёта служат данные о параметрах решётки: табличные и полученные методами экстраполяции и усреднения. Программа снабжена файлом данных об атомных радиусах элементов [2] и может рассчитывать состав фазы для всех трёх возможных причин отклонения объёма ячейки от равновесного: образования твёрдого раствора замещения, внедрения и вычитания. Понятно, что расчёты по ППП «ARSANAL» не могут дать результатов высокой точности как потому, что правило Вегарда действительно лишь в растворах низких концентраций, так и вследствие невозможности точного расчёта радиуса пор в решётке (на котором основаны расчёты для растворов внедрения и вычитания). Тем не менее, другого способа хотя бы приближённого расчёта составов фаз для многофазных систем высокой дисперсности, по-видимому, не существует.

Пакет ПП «ARSANAL» производит расчет остаточных напряжений 2 рода (микронапряжения) методом моментов и позволяет рассчитывать знак и величину остаточных напряжений, размер блоков когерентного рассеяния, а также точные координаты пика методом центра тяжести. Определение уровня остаточных напряжений в фазах покрытия проводилось путем сравнения параметров решетки легированных слоев с таковыми параметрами решетки стружки, получаемой при точении легированного слоя и просеве через сито с ячейкой 0.3 мм. Описанная методика сама по себе предполагает достаточно высокую погрешность (порядка ± 50 МПа). Однако можно оценить, как знак напряжений, так и их величину на качественном уровне (высокие или низкие).

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты исследования фазового состава представлены на рис. 1. Как видно из приведенных данных, лазерная термообработка легированных лазером покрытий приводит к изменению их фазового состава. При этом увеличивается количество твердого раствора на основе железа и уменьшается содержание карбидной составляющей и непрореагировавшего бора (при лазерном борировании). В случае нанесения обмазки с добавками карбида хрома растворение карбидной составляющей спо-

способствует повышению содержания остаточного аустенита. Кроме того, увеличивается количество окислов, поскольку технология предусматривает лазерную обработку без использования защитной атмосферы. С целью устранения данного отрицательного эффекта было принято целесообразным проводить лазерную обработку легированных слоев как повторное легирование с нанесением слоя той же обмазки, выполняющей также и защитные функции.

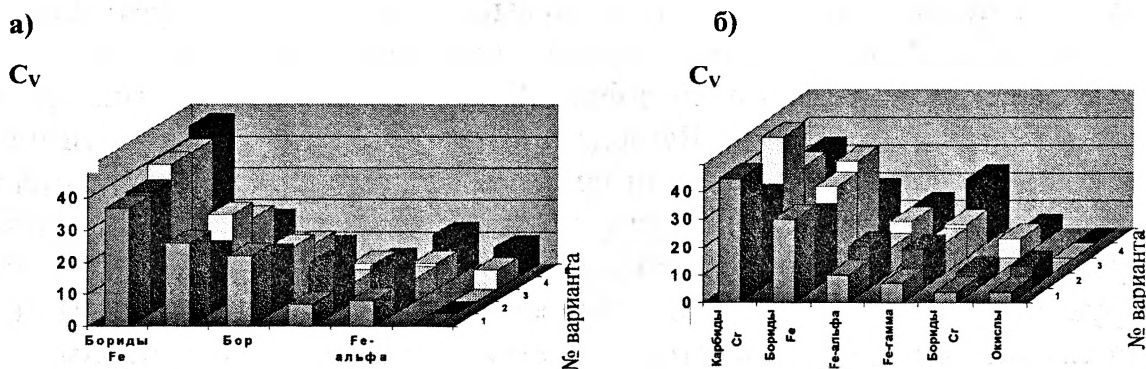


Рис. 1. Результаты полуколичественного анализа фазового состава после различных вариантов обработки при легировании из обмазок: а - $V_{AM}+V_4C_3$; б - $V_{AM}+Cr_7C_3, Cr_3C_2$

Как следует из приведенных данных, при двукратном лазерном легировании не увеличивается количество окислов в случае использования обмазки с добавками карбида бора и они исчезают в случае применения обмазки с добавками карбида хрома. Как и при лазерной закалке, возрастает количество твердого раствора железа. При этом для обоих шликеров характерно появление остаточного аустенита, что можно объяснить высокой степенью легированности твердого раствора. Наиболее вероятно, что повышение степени легированности твердого раствора связано с растворением карбидной фазы, содержание которой компенсируется за счет введения дополнительного количества легирующих компонентов.

Изменение фазового состава при увеличении скорости второго прохода с обмазками на основе карбида бора заключается в появлении небольшого количества остаточного аустенита; в случае использования шликера с добавками карбида хрома повышение скорости обработки приводит к уменьшению карбидной составляющей. Это может быть объяснено тем, что рост скорости лазерной обработки вызывает увеличение скорости остывания ванны расплава и, соответственно, повышение степени метастабильности формируемой структуры. При наличии в ванне лазерного переплава борсодержащих компонентов кристаллизация карбидной составляющей происходит во вторую очередь после образования боридных фаз. Сказанное подтверждается результатами анализа фазового состава покрытия, полученного трехкратным лазерным легированием, при котором увеличение скорости перемещения луча лазера от прохода к проходу приводит к получению структуры с еще большим количеством твердого раствора и соответствующим уменьшением количества упрочняющей фазы.

Результаты оценок степени легированности составляющих фаз, выполненные с помощью ППП «ARSANAL» приведены в табл. 2. Как видно из приведенных данных, при однократном лазерном легировании наблюдается достаточно высокая степень легированности структурных составляющих, которая сохраняется при последующей лазерной закалке, хотя ее уровень и снижается для всех фаз. Следует отметить неравновесность упрочняющей фазы для всех вариантов лазерной обработки, при этом цементит обогащается бором и представляет собой бороцементит.

Таблица 2. Оценки природы и степени легированности составляющих фаз

Фаза	Предполагаемая примесь или новый состав фазы				
	1	2	3	4	5
<i>Аморфный бор + карбид бора</i>					
Fe α	C _{0,03}	C _{0,01}	Fe α	C _{0,02}	C _{0,02}
Fe γ	Fe γ	Fe γ	Fe γ	Fe γ	Fe γ
Fe ₂ B	Fe ₂ B _{1,007}	Fe ₂ B	Fe ₂ B	Fe ₂ B	Fe ₂ B
FeB	FeB	FeB _{1,009}	FeB _{1,005}	FeB _{1,003}	FeB _{1,0025}
Fe ₃ C	Fe ₃ C	Fe ₃ C _{0,95} B _{0,05}	Fe ₃ C _{0,937} B _{0,063}	Fe ₃ C _{0,973} B _{0,027}	Fe ₃ C _{0,977} B _{0,023}
<i>Аморфный бор + карбид хрома</i>					
Fe α	Cr _{0,08}	Cr _{0,045}	Fe α	Fe α	Fe α
Fe γ	C _{0,8}	C _{0,63}	Fe γ	C _{0,8}	C ₁
<i>Продолжение таблицы 2</i>					
Fe ₂ B	(Fe _{1,991} Cr _{0,009})B	Fe ₂ B _{0,9955}	Fe ₂ B _{0,994}	Fe ₂ B _{0,996}	Fe ₂ B _{0,997}
FeB	(Fe _{0,93} Cr _{0,07})B	(Fe _{0,925} Cr _{0,075})B	(Fe _{0,94} Cr _{0,06})B	(Fe _{0,965} Cr _{0,035})B	(Fe _{0,98} Cr _{0,02})B
Cr ₃ C ₂	Cr ₃ C _{2,015}	Cr ₃ C _{2,008}	Cr ₃ C _{2,0065}	Cr ₃ C _{2,0085}	Cr ₃ C _{2,01}
Cr ₇ C ₃	Cr ₇ C _{3,018}	Cr ₇ C _{3,008}	Cr ₇ C _{3,001}	Cr ₇ C _{3,001}	Cr ₇ C _{3,001}
Fe ₂ C	Fe ₂ CB _{0,014}	Fe ₂ CB _{0,0115}	Fe ₂ CB _{0,015}	Fe ₂ CB _{0,012}	Fe ₂ CB _{0,0135}

Результаты оценок напряжений в твердорастворных фазах для двукратной обработки приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характер и уровень остаточных напряжений

Фаза	Остаточные напряжения при вариантах обработки, МПа			
	1	2	3	4
<i>Аморфный бор + карбид хрома</i>				
α-фаза	-295	-202	+12	-26
Аустенит	+126	+16	+801	-658
<i>Аморфный бор + карбид бора</i>				
α-фаза	-44	-196	-105	-213

Примечание: знаки + и - соответствуют растягивающим и сжимающим напряжениям соответственно.

Анализ полученных данных свидетельствует, что в α -фазе формируются сжимающие напряжения, а в остаточном аустените - растягивающие напряжения. Корреляционный анализ между напряжениями в α - и γ -фазах показал наличие статистически значимой регрессии вида: $y=A+B/x$, где x - остаточные напряжения в α -фазе, y - в аустените. Иначе говоря, остаточные напряжения в α -фазе и аустените обратно пропорциональны.

Таким образом, проведенные исследования по реализации процесса неоднократной лазерной обработки показали следующее:

1) при повторном лазерном легировании происходит количественное изменение фазового состава;

2) управление режимами повторной обработки позволяет регулировать степень метастабильности твердого раствора в широких пределах, а также изменять градиент физико-механических свойств по глубине слоя.

Выводы. Разработанная методика пакета ПП ARSANAL позволяет значительно упростить и автоматизировать расшифровку фазового состава, определение уровня остаточных напряжений и степень легированности фаз. Результаты расшифровки позволяют управлять комплексом физико-механических свойств и определять оптимальные режимы технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. Рентгенографический и электронно-графический анализ металлов.- М.: Металлургиздат, 1963. – 255с
2. Л. И. Миркин. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. - М.: Физматгиз, 1961.

УДК 621.923

Ящерицын П. И., Ракомсин А. П., Сергеев Л. Е., Сидоренко М. И., Сенчуров Е. И

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НАРУЖНЫХ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

ГНУ «Физико-технический институт ИЛИ Беларуси»,

РУП «МАЗ»,

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Беларусь*

Введение.

Конические поверхности широко применяются в машиностроении в виде пробок кранов для арматуры, центров станков, шеек шпинделей, дроссельных