



УДК 669.178.58.001.5

КАПЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС МЕТАЛЛА ПРИ ПЛАЗМЕННО-ИНДУКЦИОННОМ ВЫРАЩИВАНИИ ПЛОСКИХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМА

**М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. Ф. Торхов,
В. В. Якуша, А. Н. Гниздыло**

Рассмотрен процесс переноса металла при плазменно-индукционном выращивании профилированных монокристаллов вольфрама. Исследовано влияние скорости перемещения плазматрона и диаметра расходимых прутков на свойства переноса. Показано, что в исследуемом диапазоне их изменения плазменно-индукционный процесс выращивания монокристаллов вольфрама характеризуется крупнокапельным переносом металла с массой переходящих капель в среднем от 0,71 до 1,35 г.

Process of metal transfer is studied in plasma-induction growing of shaped single crystals of tungsten. Effect of plasmatron movement speed and diameter of consumable rods on the properties of transfer was investigated. It is shown that in the investigated range of their changes the plasma-induction method of growing tungsten single crystals is characterized by a coarse-drop transfer of metal of a mass of transferring drops on average from 0.71 up to 1.35 g.

Ключевые слова: *капельный перенос металла; плазменно-индукционная зонная плавка; монокристалл вольфрама; фронт кристаллизации; скорость перемещения плазматрона; расходимый пруток*

Капельный перенос металла в процессах специальной электрометаллургии определяет условия рафинирования и кристаллизации слитка [1]. При плазменно-индукционном выращивании монокристаллов тугоплавких металлов (рис. 1) соизмеримость размеров анодного пятна плазменной дуги, капли жидкого металла и металлической ванны в наибольшей степени влияют на взаимозависимость параметров переноса металла и одновременно происходящих процессов рафинирования металла, а также формирования монокристаллической структуры. Поглощение либо выделение газов, рафинирование от неметаллических включений и вредных примесей протекают в пленке на торце плавящегося прутка, в капле жидкого металла и в локальной металлической ванне. Энтальпия ванны жидкого металла у фронта кристаллизации монокристалла в основном определяется теплотой, вкладываемой плазменной дугой и электромагнитным полем тока индуктора, скрытой теплотой кристаллизации, а также теплотой, вносимой каплями жидкого металла.

В работе [2] показано, что вследствие капельного переноса металла кристаллизация монокристаллов происходит с разной скоростью, при этом масса движущейся ванны жидкого металла циклически изменяется. Однако вопросы количественной оценки параметров переноса переплавляемого металла в данной работе не рассмотрены.

Среди существующих методов исследования капельного переноса металла в процессах сварки и специальной металлургии выделяют прямые и косвенные [3]. К распространенным методам первой группы, позволяющим непосредственно представить картину плавления и переноса присадочного металла, относят различные виды скоростных кино съемок. Наиболее используемыми косвенными методами являются основанные на измерении и осциллографировании напряжения и тока процесса переноса с последующей обработкой и анализом полученных данных.

Цель исследований заключается в изучении влияния скорости перемещения плазменного источника нагрева и диаметра расходимых прутков на параметры переноса металла при выращивании профилированных монокристаллов вольфрама.

В качестве отправной методики выбран широко применяемый в металлургической практике подход

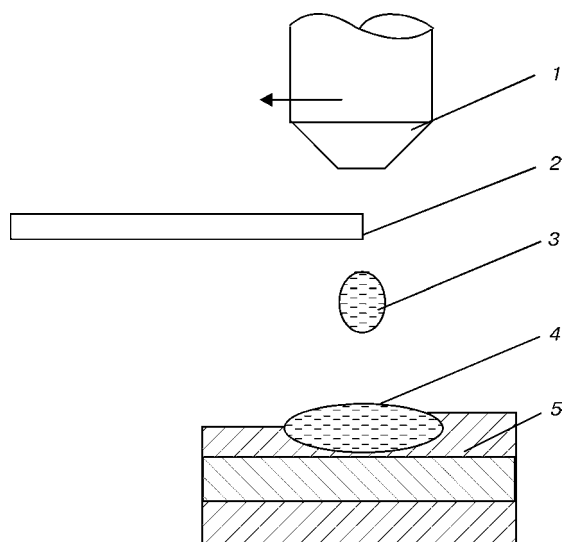


Рис. 1. Схема переноса металла при плазменно-индукционной зонной плавке монокристаллов тугоплавких металлов: 1 — плазмоторон; 2 — переплавляемый пруток; 3 — капля жидкого металла; 4 — металлическая ванна; 5 — монокристаллические слои

к определению основных параметров переноса металла по частоте перехода каплей жидкого металла в металлическую ванну. Продолжительностью взаимодействия формирующейся капли металла с плазменной дугой для анализа принято усредненное по десяти циклам время повторяемости одних и тех же составных актов капельного переноса с точкой отсчета от момента отрыва очередной капли. Массу переходящих каплей определяли расчетным путем исходя из принятого допущения о равенстве линейной скорости плавления переплавляемых прутков и скорости движения плазмоторона. Массу испарившегося металла в расчете не учитывали.

Экспериментальные исследования проведены на полупромышленной установке УП-122 М для плазменно-индукционного выращивания монокристаллов тугоплавких металлов Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

В качестве расходных материалов выбраны прутки технической чистоты вольфрама диаметром 3, 4, 5 и 8 мм, затравочного кристалла — цилиндрический монокристалл вольфрама диаметром 20 мм. В эксперименте использовали плазмообразующую смесь, состоящую из 70 % гелия и 30 % аргона.

С целью уменьшения влияния на перенос металла абсорбированных газов и влаги на стенках печного пространства камеру после очистки и обезжиривания вакуумировали в течение 30 мин до 1,33 Па с последующим одноразовым «промытием» и заполнением аргоном до избыточного давления 112 кПа. В ходе экспериментов ток плазмоторона поддерживали на постоянном уровне (400... 405 А). Напряжение на дуге составляло 38... 40 В, расход плазмообразующей смеси — 15 л/мин. Мощность дополнительного индукционного обогрева также поддерживали постоянной.

Непосредственные измерения проводили после одночасовой холостой (без подачи расходных прутков) работы плазмоторона. В течение этого вре-

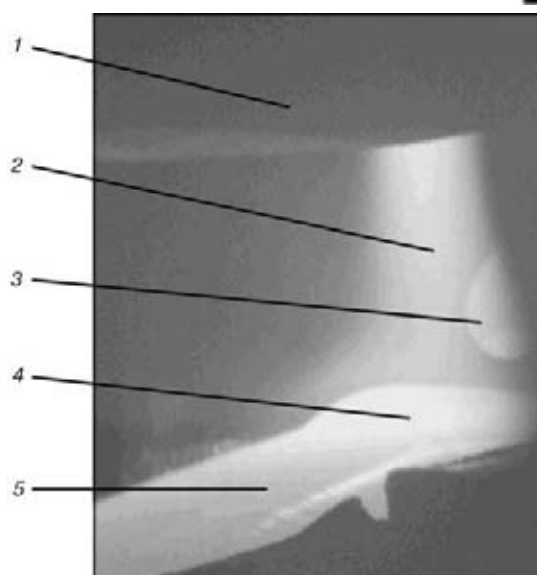


Рис. 2. Процесс образования капли жидкого металла на торце переплавляемого прутка при плазменно-индукционном выращивании профилированных монокристаллов вольфрама: 1 — сопло плазмоторона; 2 — плазменная дуга; 3 — капля жидкого металла; 4 — локальная металлическая ванна; 5 — монокристалл

мени состав рабочей атмосферы печи, согласно данным работы [4], стабилизируется.

Скорость движения плазмоторона изменяли в широких пределах (от 7 до 30 мм/мин), фиксируя время образования каплей. Измерения проводили трижды при одних и тех же значениях скорости движения плазмоторона и диаметра переплавляемых прутков. Результаты измерений и выполненных расчетов приведены в таблице.

Размеры формирующихся каплей и тип переноса обусловлены соотношением сил, действующих на жидкую каплю, удерживающуюся на торце переплавляемого прутка. Картина силовых факторов, определяющих равновесие капли в таком положении при плазменно-индукционном выращивании монокристаллов отличается от картин, характерных для дуговой сварки и канонических схем плазменно-дугового, вакуумно-дугового и электрошлакового переплавов тем, что переплавляемый пруток и источник нагрева (плазменная дуга) электрически изолированы друг от друга.

В исследуемом процессе выращивания монокристаллов силовое воздействие на каплю обусловлено тремя факторами. С одной стороны, это сила поверхностного натяжения металла, удерживающая каплю на торце прутка и, с другой, — гравитационная сила массы капли и газодинамическое давление плазменного потока, которые инициируют ее отрыв. При достижении каплей критической массы равновесие в рассматриваемой системе становится неустойчивым, и она стремится оторваться от прутка. Смещение равновесия в сторону отрыва капли связано с увеличением массы капли и силы, вызванной газодинамическим давлением дуги в результате роста ее массы и миделевого сечения [5, 6]. Кроме того, тепловое воздействие плазменной дуги приводит к перегреву жидкого металла в капле и резкому сни-



Параметры капельного переноса металла при плазменно-индукционном выращивании плоских монокристаллов вольфрама

Диаметр прутка, мм	Скорость перемещения плазматрона $v_{пл}$, мм/мин	Время образования капли $t_{ср}$, с			Масса капли m , г			
		$t_{ср1}$	$t_{ср2}$	$t_{ср3}$	m_1	m_2	m_3	$m_{ср}$
8	10,0	8,40	8,25	8,50	1,34	1,31	1,35	1,33
	20,0	4,15	4,20	4,35	1,32	1,34	1,38	1,35
	30,0	2,86	2,80	2,83	1,37	1,34	1,35	1,35
5	7,6	24,20	24,80	25,70	1,14	1,17	1,21	1,18
	20,0	9,00	8,90	9,50	1,12	1,11	1,18	1,14
	30,0	6,05	5,50	6,10	1,13	1,03	1,14	1,10
4	10,6	23,70	22,50	21,80	1,00	0,95	0,92	0,96
	20,0	9,00	8,80	9,10	0,72	0,70	0,72	0,71
3	15,0	21,30	22,50	23,00	0,72	0,76	0,77	0,75

Примечание. Масса капель рассчитана исходя из плотности вольфрама 19 г/см^3 .

жению его поверхностного натяжения, а следовательно, — к ослаблению силы, удерживающей ее на краю прутка. Процесс плазменно-индукционного выращивания монокристаллов вольфрама в диапазоне изменения исследуемых параметров характеризуется крупнокапельным переносом металла с массой переходящих капель в среднем от 0,71 до 1,35 г (рис. 2).

Установлено, что влияние скорости перемещения плазматрона на массу переходящих капель неоднозначно для разных диаметров прутков (рис. 3). Кривые 1 и 2 показывают, что для прутков диаметром 5 и 8 мм масса переходящих капель практически не зависит от изменения скорости. Скорость перемещения плазменного источника нагрева более существенно влияет на массу капель жидкого металла, формирующихся при переплаве прутков малого диаметра.

Для прутков диаметром 4 мм и меньше установлено, что с ростом скорости плазматрона масса переходящих капель уменьшается. Вероятно, установленный факт можно объяснить различиями в характере плавления прутков разных диаметров, т. е. скоростью нагрева и перегревом капли за меньший промежуток времени. При этом сила поверхностного натяжения, как отмечалось выше, снижается, и отрыв капли происходит после достижения меньшей массы. Таким образом, при переплаве прутков малого поперечного сечения с увеличением скорости перемещения плазматрона масса переходящих капель жидкого металла уменьшается.

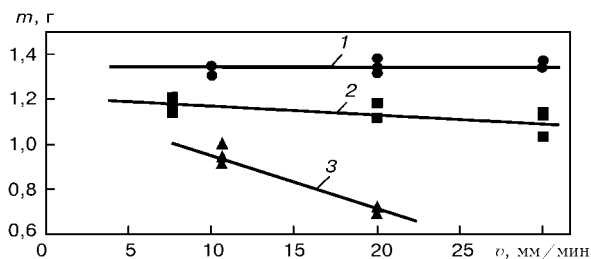


Рис. 3. Влияние скорости перемещения плазматрона $v_{пл}$ на массу m капли: 1–3 — прутки диаметром соответственно 8, 5 и 4 мм

В ходе экспериментов установлено, что масса капель на торце прутка при одинаковой энергетике процесса плавки и скорости перемещения плазматрона однозначно определяется поверхностным натяжением металла. Уровень поверхностного натяжения для одного и того же металла зависит от диаметра прутка, определяющего периметр смачивания. Характер кривой (рис. 4), устанавливающий зависимость массы капли от диаметра переплавляемого прутка, хорошо согласуется с данными, приведенными в работе [1] для плазменно-дугового переплава. Масса капель жидкого металла с увеличением диаметра расходуемых прутков возрастает не пропорционально. Ее изменение при использовании прутков диаметром более 8 мм становится все менее значительным.

В диапазоне скоростей перемещения плазматрона от 15 до 25 мм/мин, наиболее характерном для плазменно-индукционного выращивания монокристаллов вольфрама, для переплава с целью повышения производительности процесса при практически одинаковом уровне рафинирования металла наиболее целесообразно использовать прутки вольфрама диаметром 8 мм.

С увеличением сечения прутка обнаруживается заметное экранирование жидкого металла локальной ванны поверхностью переплавляемого прутка. При этом незначительно отличающиеся по массе переходящие капли вносят существенное возмущение

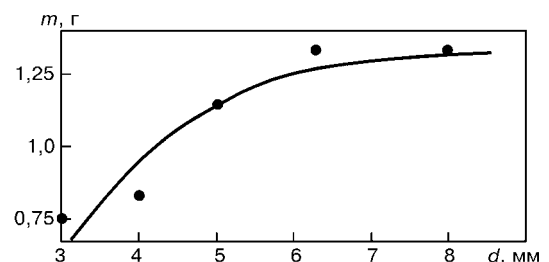


Рис. 4. Влияние диаметра d прутка на массу m капли ($v_{пл} = 15 \text{ мм/мин}$)



в тепловое состояние ванны и условия кристаллизации металла.

В работе [2] также установлено, что при использовании для выращивания монокристаллов вольфрама прутков диаметром более 8 мм в теле кристаллов возможно образование грубых дефектов монокристаллической структуры — фантомных зерен с ориентацией, отличающейся от основной ориентации монокристалла. Присутствие в теле монокристалла фантомных зерен недопустимо.

Выводы

1. Установлено, что в исследуемом диапазоне изменения скорости движения плазмотрона и диаметра переплавляемых прутков при постоянных токе плазмотрона и расходе плазмообразующего газа процесс плазменно-индукционного выращивания монокристаллов вольфрама характеризуется крупнокапельным переносом металла с массой переходящих капель в среднем от 0,71 до 1,35 г.

2. Показано, что масса капель жидкого металла при переплаве прутков диаметром от 5 до 8 мм практически не зависит от скорости плазмотрона. Уменьшение массы переходящих капель при переплаве прутков малых диаметров связано с увеличением скорости нагрева и перегревом капли за меньший промежуток времени.

3. Определено, что для повышения производительности процесса и обеспечения необходимых условий кристаллизации металла без образования дефектов структуры в виде фантомных зерен следует использовать для переплава прутки вольфрама диаметром 8 мм.

1. *Клюев М. М.* Плазменно-дуговой переплав. — М.: Металлургия, 1980. — 256 с.
2. *Влияние* технологических параметров на возникновение дефектов при послыном формировании крупных профилированных монокристаллов тугоплавких металлов / В. А. Шаповалов, А. А. Коваленко, И. В. Шейко, В. В. Жолудь // Пробл. спец. электротехнологии. — 1993. — № 4. — С. 92–94.
3. *Походня И. К.* Металлургия дуговой сварки: процессы в дуге и плавление электродов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 222 с.
4. *Исследование* динамики газовой фазы при плазменно-дуговой плавке вольфрама / В. А. Шаповалов, И. В. Шейко, В. А. Иващук и др. // Пробл. спец. электротехнологии. — 1992. — № 1. — С. 75–77.
5. *Краснов А. Н., Шариквер С. Ю., Зильберберг В. Г.* Низкотемпературная плазма в металлургии. — М.: Металлургия, 1970. — 216 с.
6. *Исследование* газодинамического давления плазменной дуги на металл / Ю. В. Латаш, Г. Ф. Торхов, В. К. Кедрин, М. И. Таранов // Пробл. спец. электротехнологии. — 1981. — Вып. 15. — С. 64–69.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 01.04.2005

РАЗРАБОТАНО В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАНУ

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ПЛАВКА БЛОКОВ ГУБЧАТОГО ТИТАНА

С целью снижения стоимости исходных шихтовых материалов в ИЭС им. Е. О. Патона предложено осуществлять переплав недробленных блоков губчатого титана в специализированной ЭЛУ с промежуточной емкостью.

При этом очистка поверхности блока от пленок и загрязнения производится непосредственно в ЭЛУ на этапе предварительного нагрева.

В процессе плавки крица непрерывно подается в рабочее пространство, где под действием электронных лучей происходит прогрев объема блока и его предварительная дегазация. Процесс протекает стабильно и устойчиво. Сравнение выходов годного металла ЭЛПЕ показывает, что при плавке крицы и кусковых отходов потери титана на испарение фактически одинаковы и на 30...40 % меньше, чем при плавке дробленой губки фракции 12...70 мм.

Распределение примесных элементов по длине слитков равномерное, а их содержание соответствует требованиям стандартов. Ультразвуковой контроль слитков и исследования темплетов показали, что структура металла плотная, однородная, без дефектов.

Предложенная технология ЭЛПЕ блоков губчатого титана обеспечивает повышение технико-экономических показателей по сравнению с ЭЛПЕ губчатого титана фракций 12...70 мм на 20 %.

Применение. Технология применяется для получения качественных титановых слитков непосредственно из недробленных блоков губчатого титана.

