



УДК 669.187.526.001.4

ТЕМПЕРАТУРА МЕТАЛЛА НА СКАТЕ РАСХОДУЕМОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЭЛПЕ СПЛАВОВ ТИТАНА

Н. Ф. Наконечный, В. Н. Федоров, В. А. Щекин-Кротов

Приведена методика расчета температуры металла, стекающего со ската расходоуемой заготовки при электронно-лучевом переплаве с промежуточной емкостью сплава титана VT1-0. Показано, что с увеличением производительности переплава с 0,078 до 0,148 кг/с температура перегрева металла над ликвидусом увеличилась с 31...55 до 93...172 °С.

Procedure of calculation of temperature of metal flowing down from the consumable billet inclined edge in electron beam intermediate crucible remelting of VT1-0 titanium alloys is described. It is shown that with increase in remelting efficiency from 0.078 to 0.148 kg/s the temperature of metal overheating above liquidus was increased from 31...55 up to 93...172 °C.

Ключевые слова: электронно-лучевой переплав; промежуточная емкость; расходоуемая заготовка; слиток; температура

Электронно-лучевой переплав (ЭЛП) относится к одному из самых энергоемких металлургических производств. Для его совершенствования необходимо правильно рассчитывать сопровождающие его процессы теплообмена и, в частности, тепловые процессы и баланс тепла на скате расходоуемой заготовки (РЗ). Хотя температура является важнейшим фактором, характеризующим тепловой процесс, до сих пор неясно, какова она у металла, стекающего со ската РЗ в промежуточную емкость (ПЕ). Автор работы [1] считает, что температура металла равна температуре его плавления, в работе [2] высказано мнение, что перегрев не превышает нескольких десятков градусов, а в работе [3], что он составляет более сотни градусов. Такое разнообразие мнений, по-видимому, обусловлено отсутствием надежных методов определения температуры расплавленного металла внутри плавильной камеры электронно-лучевой установки.

Цель данной работы состоит в том, чтобы определить взаимосвязь теплофизических свойств переплавляемого металла и технологических параметров плавки с температурой жидкого металла на скате РЗ и на основании этого предложить методику расчета указанной температуры.

Переплав расходоуемой заготовки происходит при постоянной мощности электронных лучей и практически постоянной массовой скорости плавления и вытягивания слитка, которые непрерывно контролируются приборами. Плотность распределения энергии на торце РЗ также известна. Знание этих параметров позволяет рассчитывать температуру жидкого металла на скате заготовки.

Рассмотрим ситуацию на скате сплошной расходоуемой заготовки из чистого титана при одинаковой плотности энергии на поверхности ската. Плотность теплового потока, проходящего сквозь скат РЗ, можно представить формулой

$$q_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{ж}} - t_{\text{пл}}}{\frac{\delta}{\lambda_{\text{ж}}}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ж}}$ и $t_{\text{пл}}$ — температура жидкого металла со стороны падения электронных лучей и температура поверхности ската заготовки, по которой стекает жидкий металл соответственно. Поскольку эта поверхность есть фронт плавления РЗ из титана, ее температура равна температуре плавления титана, которая является постоянной и равна 1668 °С; $\lambda_{\text{ж}} = 33,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ — теплопроводность жидкого титана [4]; δ — толщина слоя жидкого металла, стекающего по скату.

Из приведенного уравнения можно определить $t_{\text{ж}}$, если известны остальные величины, входящие в это уравнение:

$$t_{\text{ж}} = q_{\text{ти}} \frac{\delta}{\lambda_{\text{ж}}} + t_{\text{пл}}. \quad (2)$$

В уравнении (2) неизвестными являются две величины: толщина слоя жидкого металла и плотность теплового потока, проходящего сквозь скат. Толщина слоя жидкого металла (капелек, струек) на скате РЗ может быть определена методом сравнения его толщины с размерами сечения расходоуемой заготовки, которые известны (измерены на фотографиях ската).

Плотность теплового потока, проходящего сквозь скат расходоуемой заготовки, при некоторой



толщине слоя жидкого металла на нем равна мощности тепловой энергии q , затрачиваемой на нагрев, плавление и перегрев массы металла, равной массовой скорости переплава, отнесенной к площади поверхности ската, которая в данном случае является также площадью поверхности фронта плавления:

$$q_{\text{тп}} = \frac{q}{S_{\text{фп}}} = \frac{q}{S} = \frac{[c_{\text{т}}(t_{\text{пл}} - t_{\text{н}}) + c_{\text{ж}}(t_{\text{п}} - t_{\text{пл}}) + q_{\text{пл}}]m}{S}, \quad (3)$$

где $c_{\text{т}} = 654,9$ Дж/(кг·°С) — средняя теплоемкость твердого титана; $c_{\text{ж}} = 989,2$ Дж/(кг·°С) — теплоемкость жидкого титана [4]; $t_{\text{н}}$, $t_{\text{п}}$ — начальная температура расходуемой заготовки и температура перегрева жидкого металла соответственно; $q_{\text{пл}} = 295 \cdot 10^3$ Дж/кг — теплота плавления титана, ее рекомендуемое значение [5]; m — массовая скорость плавления, кг/с; $S_{\text{фп}}$ — площадь поверхности фронта плавления. При плавлении на заводской ЭЛУ она практически вертикальна. Поэтому с достаточной точностью можно считать, что она равна площади S поперечного сечения расходуемой заготовки.

Учитывая, что

$$t_{\text{п}} = \frac{t_{\text{ж}} + t_{\text{пл}}}{2} \quad (4)$$

и принимая во внимание уравнение (2), находим, что $(t_{\text{п}} - t_{\text{пл}})$ в уравнении (3) равно $\frac{1}{2} q_{\text{тп}} \frac{\delta}{\lambda}$. Подставив это значение в уравнение (3) и решив его относительно $q_{\text{тп}}$, получим

$$q_{\text{тп}} = \frac{[c_{\text{т}}(t_{\text{пл}} - t_{\text{н}}) + q_{\text{пл}}]m}{S - \frac{1}{2}c_{\text{ж}} \frac{\delta}{\lambda} m}. \quad (5)$$

Подставив $q_{\text{тп}}$ из уравнения (5) в выражение (2), найдем температуру жидкого металла со стороны падения электронных лучей:

$$t_{\text{ж}} = \frac{[c_{\text{т}}(t_{\text{пл}} - t_{\text{н}}) + q_{\text{пл}}] \frac{\delta}{\lambda} m}{S - \frac{1}{2}c_{\text{ж}} \frac{\delta}{\lambda} m} + t_{\text{пл}}. \quad (6)$$

Подставив уравнение (6) в уравнение (4), определим среднюю температуру, при которой жидкий титан стекает по скату расходуемой заготовки в промежуточную емкость:

$$t_{\text{п}} = \frac{1}{2} \frac{[c_{\text{т}}(t_{\text{пл}} - t_{\text{н}}) + q_{\text{пл}}] \frac{\delta}{\lambda} m}{S - \frac{1}{2}c_{\text{ж}} \frac{\delta}{\lambda} m} + t_{\text{пл}}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что температура жидкого металла изменяется прямо пропорционально толщине его слоя и массовой скорости переплава. Если δ стремится к нулю, то температура жидкого металла приближается к температуре плавления титана.

Заменив символы постоянных величин в уравнениях (5) и (6) их числовыми значениями, получим формулы, удобные для расчета:

$$q_{\text{тп}} = \frac{1072742,6 m}{S - 14,94 \delta m} + t_{\text{пл}}; \quad (8)$$

$$t_{\text{ж}} = \frac{32401 m \delta}{S - 14,94 m \delta} + t_{\text{пл}}; \quad (9)$$

$$t_{\text{п}} = \frac{16200,5 m \delta}{S - 14,94 m \delta} + t_{\text{пл}}. \quad (10)$$

Величину перегрева металла, стекающего в промежуточную емкость, над температурой ликвидус найдем из

$$\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{ж}} - t_{\text{пл}}. \quad (11)$$

Жидкий металл на скате расходуемой заготовки образуется из твердого. Толщина его слоя изменяется от нуля до некоторого максимального значения с ростом температуры титана выше температуры плавления.

В заводской практике расходуемая заготовка очень редко бывает сплошной, состоящей из одного куска. В подавляющем большинстве случаев РЗ состоит из множества отдельных кусков лома или брикетов губки, разделенных пустотами. При этом долю площади фронта плавления на скате РЗ можно с достаточной степенью точности считать равной доле объема k расходуемой заготовки, заполненного ломом: $S_{\text{фп}} = kS$.

Поскольку энергия электронных лучей распределена равномерно на скате расходуемой заготовки, то через фронт плавления проходит только часть теплового потока, участвующего в нагреве, плавлении и перегреве металла. Эта часть энергии пропорциональна доле площади фронта плавления, т. е. $q_{\text{фп}} = qk$. Поэтому плотность теплового потока на фронте плавления остается неизменной:

$$q_{\text{тп}} = \frac{q_{\text{фп}}}{S_{\text{фп}}} = \frac{qk}{Sk} = \frac{q}{S} \quad (12)$$

и не зависит от того, сплошная ли расходуемая заготовка или состоит из отдельных кусков.

Энергия электронов, попадающих в промежуток между кусками, расходуется на нагрев металла перед фронтом плавления. Непосредственно через фронт плавления она не проходит и поэтому влияния на плотность теплового потока не оказывает.

Из изложенного выше следует, что для того, чтобы вычислить температуру металла, стекающего со ската расходуемой заготовки в промежуточную емкость, необходимо определить массовую скорость плавления РЗ, толщину слоя жидкого металла (капель и струек) и площадь ската заготовки.

В процессе четырех производственных плавов сплава ВТ1-0 (99 % титана) были проведены такие измерения. Массовую скорость плавления определяли по изменению длины слитка l во времени t . Диаметр капель и толщину струек определяли, сравнивая их с размерами пластинок лома и сечения

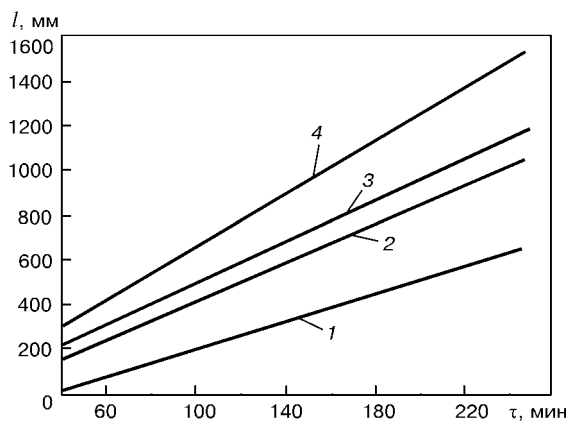


Рис. 1. Изменение длины слитков в зависимости от продолжительности переплава: 1-4 — номера плавков

расходуемой заготовки в натуре и на фотографиях, выполненных в масштабе 1:3.

На рис. 1 показано изменение длины слитков диаметром 0,655 м в зависимости от продолжительности переплава. Как видно, длина слитков увеличивается монотонно и прямо пропорционально продолжительности переплава, что свидетельствует о стабильности процесса и его постоянной скорости.

На плавках 1-3 наблюдали за образованием жидкого металла на скате РЗ, формированием капель и струек (рис. 2). На рис. 3 показана схема образования капли. Жидкая фаза на отдельной пластинке лома появляется в виде слезки, которая затем превращается в каплю. Преодолев силу поверхностного натяжения, капля оказывается в промежуточной емкости или, сливаясь с другими каплями, образует струйку. По визуальной оценке размер всех скатывающихся капель представляется одинаковым. Диаметр капель при измерении его на фотографиях оказался равным $13 \pm 1,5$ мм. При образовании струек из капель их толщина уменьшается примерно до 5 мм.

Процесс образования капель в исследуемых плавках протекал в пределах от долей секунды до нескольких секунд. Стекая по скату шириной ~0,5 м, капли образовывали 2-3, иногда 4 ручейка то в од-

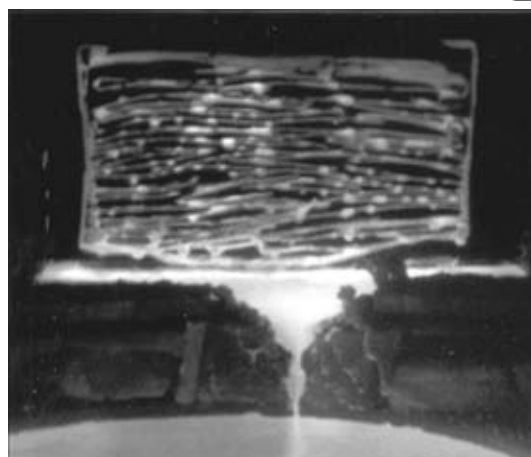


Рис. 2. Вид ската расходуемой заготовки из пластинчатого лома в процессе переплава сплава ВТ1-0 (масштаб 1:8,4)

ном, то в другом месте. Жидкий металл со ската расходуемой заготовки стекал в промежуточную емкость в виде струек и капель. Поэтому их температура была конечной температурой жидкого металла на скате расходуемой заготовки.

Расчетная относительная погрешность проведенных измерений скорости плавления металла, толщины его слоя на скате РЗ и площади поверхности ската не превышает 15%. Относительная совокупная погрешность измерений остальных величин, входящих в уравнения (6) и (7), не превышает 5%. Таким образом, общая относительная погрешность определения температуры перегрева жидкого металла на скате РЗ путем расчета не превышает 20% от ее истинного значения.

В таблице представлены параметры переплава титана, а также результаты расчета температуры жидкого металла на скате расходуемой заготовки.

Мощность, потребляемая пушками, плавящими расходуемую заготовку, не используется для расчета температуры, однако она определяет массовую скорость переплава, которая входит в уравнения (5)-(10). Площадь поперечного сечения РЗ является расчетным параметром в этих уравнениях.

Параметры переплава и температура жидкого металла на скате расходуемой заготовки

№ плавки	Мощность, потребляемая пушками, кВт	Площадь поперечного сечения РЗ, м ²	Коэффициент заполнения коробов	Массовая скорость переплава, кг/с	Плотность теплового потока на скате РЗ, кВт/м ²	Удельная скорость переплава, кг/(м ² ·с)	Температура, °С				Перегрев над ликвидусом, °С	
							капли		струйки		капли	струйки
							со стороны падения лучей	средняя	со стороны падения лучей	средняя		
1	392	0,208	—	0,078	418	0,375	1778	1723	1730	1699	55	31
							1836	1752	1762	1715	84	42
2	448	0,208	0,28 0,48	0,102	533	0,490	1815	1741	1750	1709	73	41
							827	0,728	1893	1780	1792	1730
3	476	0,208	0,35 0,46	0,113	616	0,543	1832	1750	1760	1714	82	46
							941	0,807	1921	1794	1807	1737
4	530	0,208	—	0,148	821	0,711	1888	1778	1789	1729	110	61
							1267	1,060	2011	1840	1953	1760

Примечания: 1. Среднюю толщину капли определяли как отношение ее объема к площади поперечного сечения: $\delta = \frac{2}{3} D = 8,66$ м. 2. Диаметр капли составлял 0,013 м, толщина струйки — 0,005 м.

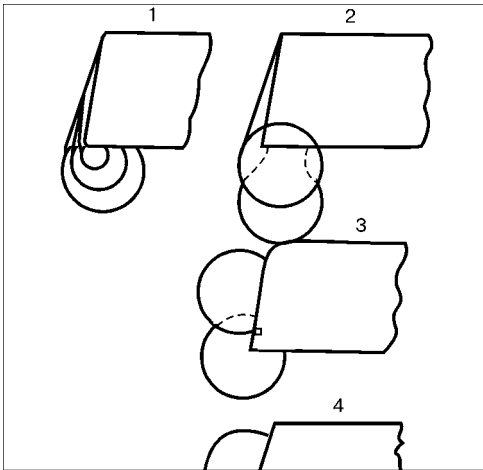


Рис. 3. Схема образования и перемещения капель титана по скату расходуемой заготовки: 1 – слезка; 2 – образование капли; 3, 4 – перемещение по скату

Представленные значения коэффициента заполнения коробов k характеризуют рыхлость (неплотность) заготовки. По площади поперечного сечения коробов и массовой скорости переплава в соответствии с уравнением (5) рассчитывали плотность теплового потока на скате расходуемой заготовки. По этим же параметрам и диаметру капель и толщине струек рассчитывали их температуру и величину перегрева над ликвидусом в соответствии с уравнениями (9)–(11).

Как видно из таблицы, температура и перегрев металла над ликвидусом неоднозначно зависят от массовой скорости переплава. Поэтому в таблице приведена также удельная скорость переплава $m_{уд}$, с которой температура связана однозначно.

Как следует из уравнений, основными параметрами, определяющими плотность теплового потока, проходящего сквозь скат (5), и температуру жидкого металла на скате РЗ (6) и (7), являются скорость переплава и площадь поперечного сечения расходуемой заготовки. Из таблицы видно, что скорость переплава изменялась от 0,078 до 0,148 кг/с и сопровождалась соответствующим ростом плотности теплового потока и температуры перегрева жидкого металла на скате РЗ. Средняя температура капли при изменении скорости переплава повышалась от 1723 до 1840 °С, т. е. в пределах 120 °С, а перегрев над ликвидусом составлял 55 и 172 °С соответственно. Аналогично изменялась и температура струек. Существенно изменялась температура жидкого металла со стороны падения электронных лучей, которая у струек и капель повысилась до 1853 и 2011 °С соответственно.

Быстрый рост температуры жидкого металла со стороны падения электронных лучей объективно является тормозом роста массовой скорости переплава при увеличении мощности энергии плавления.

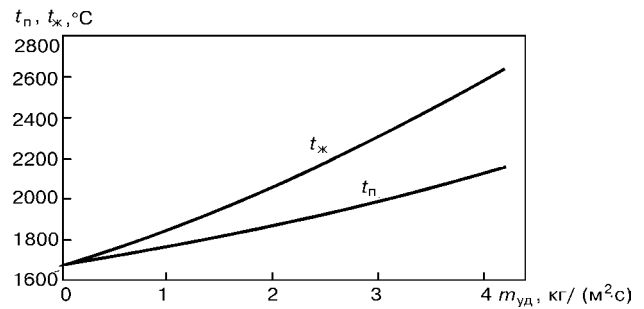


Рис. 4. Влияние удельной скорости переплава расходуемой заготовки на температуру перегрева струек и их температуру со стороны падения лучей

На рис. 4 показано изменение температуры перегрева струек t_n и их температуры со стороны падения лучей t_k при росте удельной скорости переплава до 4 кг/(м²·с). Как видно, температура перегрева выросла до 2100 °С, а температура со стороны падения лучей – до 2600 °С.

Как следует из работы [6], при температуре на поверхности ванны титана, равной 2137 °С, начинается его интенсивное испарение. Учитывая это обстоятельство, можно предположить, что рост производительности переплава вследствие непрерывного увеличения плотности теплового потока окажется невозможным из-за блокирования электронных лучей испаряющимся титаном. Явление периодического блокирования электронных лучей испаряющимся титаном описано в работе [7].

Представленные выше результаты показывают возможность расчета температуры жидкого металла по скорости переплава и толщине его слоя на скате расходуемой заготовки. Измерениями и расчетами, проведенными на четырех производственных плавках, установлено, что при повышении массовой скорости переплава с 0,078 до 0,148 кг/с температура перегрева жидкого титана над температурой ликвидус увеличилась с 31... 55 до 93... 172 °С.

1. Ахонин С. В. Расчет температуры расплава при ЭЛП титановых сплавов // Процессы литья. – 2000. – № 4. – С. 78–81.
2. Латаш Ю. В., Матях В. Н. Современные способы получения слитков особо высокого качества. – Киев: Наук. думка, 1987. – 335 с.
3. Курапов Ю. А., Мовчан Б. А. Исследование влияния особенностей электронно-лучевого нагрева на процессы рафинирования металла // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1975. – Вып. 2. – С. 59–62.
4. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
5. Теплофизические свойства титана и его сплавов / Под ред. акад. А. Е. Шейндлина. – М.: Металлургия, 1985. – 102 с.
6. Шиллер Э., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. – М.: Энергия, 1980. – 527 с.
7. Федоров В. Н., Щекин-Кротов В. А., Касумов А. М. Вибрация расплава электронным лучом при ЭЛП // Пробл. спец. электрометаллургии. – 2002. – № 2. – С. 29–30.

Завод электронно-лучевой металлургии АОЗТ «Фико», Киев
Поступила 04.10.2002