



УДК 669.187.526.001.57

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ЭЛПЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Г. В. Жук, Н. П. Тригуб, А. А. Фесан

Исследованы энергетические характеристики процесса ЭЛПЕ титановых слитков (расход электроэнергии на 1 кг металла и длительность остывания слитка в условиях вакуума). Определена зависимость указанных показателей от диаметра слитка, в том числе для крупногабаритных слитков диаметром до 1100 мм.

Power characteristics of process of EBCH of titanium alloys were studied (consumption of electric power per kilogram of metal and duration of ingot cooling under vacuum conditions). Dependence of mentioned characteristics on ingot diameter, including that for large-sized ingots of up to 1100 mm diameter, was determined.

Ключевые слова: математическое моделирование; электронно-лучевая плавка; слиток; титановый сплав; кристаллизация; остывание

Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) становится все более эффективным процессом для производства слитков титановых

сплавов [1]. Она позволяет избежать попадания в слиток включений низкой и высокой плотности, эффективно влиять на процессы рафинирования и кристаллизации металла. Все это способствует повышению качества слитков, что дает возможность рекомендовать процесс ЭЛПЕ при производстве титановых изделий, применяемых в отраслях с повышенной ответственностью (авиации, атомной энергетике). ЭЛПЕ эффективна при изготовлении крупногабаритных слитков за счет перераспределения нагрева слитка в кристаллизаторе в сторону его периферии, что позволяет получить в слитке удовлетворительную с точки зрения его дальнейшей обработки структуру. Значительным прогрессом в области ЭЛПЕ в последнее время стало использование в качестве исходной шихты недробленых блоков губчатого титана [2], вследствие чего значительно сокращаются расходы на производство титана за счет исключения операций дробления и сортировки губки, значительного упрощения подготовки шихты к плавке, усреднения состава металла в процессе переплава.

Вместе с тем, при выплавке крупногабаритных слитков (диаметром около 1 м) возникают некоторые факторы, приводящие к удорожанию стоимости 1 кг слитка. Так, исследования авторов показали, что при увеличении диаметра цилиндрических слитков повышается как мощность электронно-лучевого нагрева при плавке (рис. 1, а), так и расход электроэнергии на 1 кг слитка (рис. 1, б).

Это происходит в результате увеличения площади зеркала жидкого металла в промежуточной емкости и кристаллизаторе, потерь энергии на излучение и испарение. Указанная зависимость справедлива только для низкого уровня производительности. Что касается высоких значений производитель-

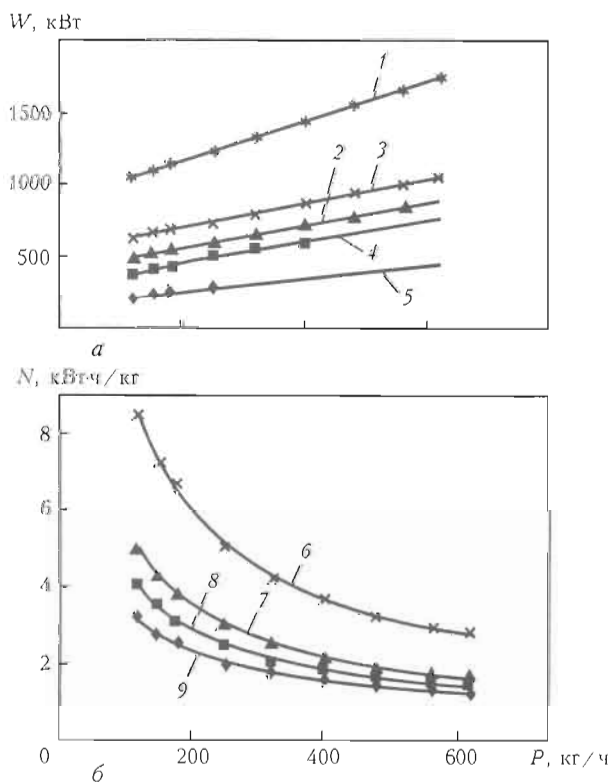


Рис. 1. Зависимость необходимой мощности W электронно-лучевого нагрева (а) и расхода электроэнергии N (б) от производительности плавки P для различных диаметров слитка, мм: 1 — 1100; 2 — 850; 3 — 630; 4 — 400; 5 — 300; 6 — 1100; 7 — 850; 8 — 630; 9 — 400

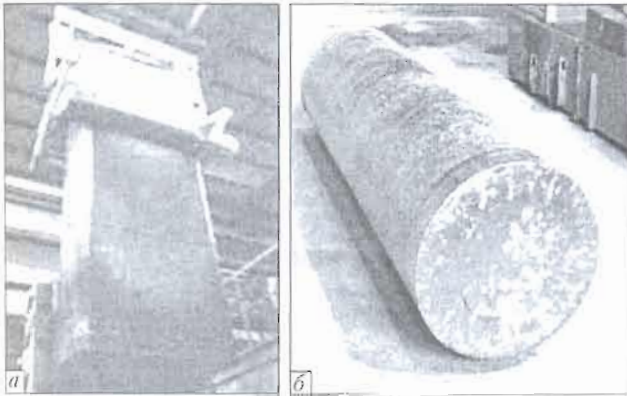


Рис. 2. Внешний вид слитка ЭЛПЕ после остывания: а — на воздухе [3]; б — в вакууме

ности для малых диаметров слитка, то они либо технически недостижимы, либо приведут к образованию недопустимой структуры производимых слитков. Если же исходить из технологически обоснованных значений производительности, то, например, расход электроэнергии на 1 кг металла для слитка диаметром 400 мм при производительности плавки 250 кг/ч больше, чем для слитка диаметром 850 мм при производительности плавки 620 кг/ч (рис. 1, б).

Важным с точки зрения протяженности во времени технологического процесса аспектом ЭЛПЕ является остывание слитка после окончания плавки. Для сокращения времени остывания общепринятыми мерами являются развакуумирование плавильной камеры и выемка слитка в условия атмосферы сразу после плавки. Здесь охлаждение слитка происходит значительно быстрее, но его поверхность при этом окисляется (рис. 2, а) [3, 4]. Остывание в условиях вакуума, хотя и способствует предотвращению окисления поверхности слитка (рис. 2, б), является достаточно длительным, особенно для массивных слитков. Если сам процесс выплавки довольно подробно изучен, то процесс остывания практически не исследован. Необходимы дополнительные исследования, в том числе и с применением методов математического моделирования, позволяющие оптимизировать соотношение времени выдержки слитка в вакуумной камере и степени окисления поверхности слитка.

Исследования процесса остывания слитков в условиях вакуума проводили для слитков титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 600... 1100 мм и длиной 4 м. Моделировали полный цикл получения слитка, включая процесс его выплавки. В результате исследований получены температурные поля слитка для различных моментов времени, вплоть до остывания до значений температуры 400... 450 °С (673... 723 К), при которых в случае развакуумирования камеры окисление поверхности слитка незначительно [5].

В результате анализа температурных полей для слитков диаметром 600, 840 и 1100 мм установлено, что время остывания слитка прямо пропорционально его диаметру, в то время как продолжительность

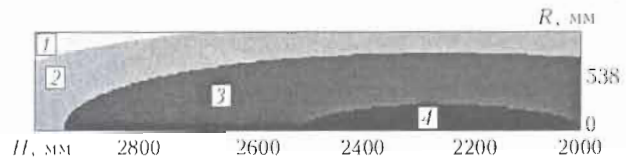


Рис. 3. Распределение температур в слитке титанового сплава Ti-6Al-4V диаметром 1100 мм после остывания при T, К: 1 — 700... 725; 2 — 725... 750; 3 — 750... 775; 4 — 775... 800

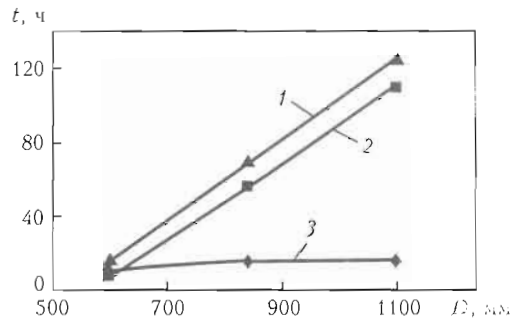


Рис. 4. Зависимость длительности плавки и остывания от диаметра слитка: 1 — общее время; 2 — продолжительность остывания; 3 — длительность плавки

плавки зависит от диаметра слитка значительно меньше, учитывая повышение производительности плавки с увеличением диаметра слитка (рис. 4).

Для слитков диаметром 840 и 1100 мм продолжительность остывания составляет соответственно более 50 и 100 ч, что представляется чрезмерным с технологической точки зрения. Так, для сравнения, время выплавки слитков не превышает 15 ч.

Выводы

1. Показано, что выплавка крупногабаритных слитков титановых сплавов требует повышенного внимания к энергетическим аспектам ЭЛПЕ: расходу электроэнергии в процессе плавки и технике остывания слитков.

2. Определено, что для крупногабаритных слитков диаметром 840 и 1100 мм остывание в условиях вакуума экономически невыгодно.

1. Kuang O. Yu, Ashraf M. Imam development of titanium processing technology in the USA // Proc. of the 11th World conf. on Titanium (Kyoto, Japan, 3-7 June 2008). — 2008. — Vol. 1. — P. 9-16.
2. Paton B. E., Zhuk H. V., Trygub M. P. Ingots crystallization in titanium sponge cakes electron beam direct melting // Ibid. — 2008. — Vol. 1. — P. 181-184.
3. Fox S. P., Terlinde G. Titanium production technology: recent advances and future needs // Proc. of the 10th World conf. on titanium (Hamburg, Germany, 13-18 July 2003). — 2003. — Vol. 1. — P. 81-94.
4. Ускоренное охлаждение слитков титана после ЭЛП / А. М. Касумов, Н. Ф. Наконечный, В. Н. Федоров, В. А. Шекин-Кротов // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 2. — С. 20-21.
5. Титановые сплавы для морской техники / И. В. Горылин, С. С. Ушков, А. Н. Хатунцев, Н. И. Лошакова. — СПб: Политехника, 2007. — 387 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 17.09.2008