



готовку, по крайней мере, в 2 раза большую по диаметру при хорошем качестве металла.

Итак, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона новый электрошлаковый процесс укрупнения тяжелых слитков, который базируется на одно- или многократной кольцевой ЭШН на центральный слиток способом ЭШН ЖМ в токоподводящем кристаллизаторе металла аналогичного химического состава, позволяет получать заготовки большого диаметра, микроструктура первичной кристаллизации которых соответствует требованиям, обеспечиваемым только в слитках ЭШП малого диаметра. Таким образом, открываются принципиально новые возможности при решении проблемы производства крупных кузнечных слитков ЭШП для поковок роторов и дисков мощных современных паровых и газовых турбин из высоколегированных сталей и сплавов, а также другой крупнотоннажной машиностроительной продукции.

1. Large 718 forgings for land based turbines / R. C. Schwant, S. V. Thamboo, A. F. Anderson et al. // Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives: Proc. intern. symp. Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives // TMS. — 1997. — № 7. — P. 141–152.
2. Митчелл А. Об изготовлении крупных поковок из сплавов, чувствительных к сегрегации // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 2. — С. 3–8.
3. Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я. / О некоторых «старых-новых» задачах ЭШП // Там же. — 2004. — № 3. — С. 7–10.

4. Новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Там же. — 2007. — № 1. — С. 3–7.
5. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, Г. С. Маринский и др. — Киев: Наук. думка, 1978. — 303 с.
6. Математические модели для систем автоматического управления процессом ЭШП полых слитков и крупногабаритных кузнечных слитков / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Л. В. Чекотило и др. // Математические методы в исследовании процессов специальной электрометаллургии. — Киев: Наук. думка, 1976. — С. 99–112.
7. Некоторые результаты числовых исследований и экспериментальной проверки математической модели выплавки полых слитков ЭШП / Б. И. Медовар, В. И. Махненко, В. М. Баглай и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1977. — Вып. 7 — С. 10–13.
8. Исследование параметров электрошлаковой плавки в токоподводящем кристаллизаторе / Ю. М. Кусков, В. И. Ус, С. В. Томиленко и др. // Там же. — 1995. — № 3. — С. 24–28.
9. Баллантайн А. С., Митчелл А., Вадье Дж. Ф. Прогнозирование структуры слитков сплава Инконель 718 ЭШП и ВДП // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1983. — Вып. 6. — С. 198–202.
10. The Macroscale Simulation of Remelting Processes / L. A. Bertram, P. R. Schusk, S. N. Kempka et al. // JOM. — 1998, March. — P. 16–21.
11. The Stochastic Modelling of Solidification Structures in Alloy 718 Remelt Ingots // L. Nastac, S. Sundarra, O. Ku et al. // Ibid. — P. 30–35.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 09.09.2008

УДК 669.117.56

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

А. Митчелл

Приведен обзор исследований в области применения электрошлакового переплава (ЭШП) для материалов аэрокосмической промышленности, показаны результаты этих исследований.

Review is made of investigations in the field of ESR application for materials of aerospace industry, the results of these investigations are shown.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав; сплавы; детали двигателей; качество

**Введение.** Впервые ЭШП в производстве аэрокосмических сплавов применили как процесс Гопкинса с целью повышения качества изделий. Технологии открытой индукционной (ОИП) или электродуговой (ЭДП) плавки были непригодны для получения высоколегированных сталей или сплавов на основе никеля с необходимым уровнем чистоты металла и низким содержанием серы, требуемых для изготовления деталей двигателей. Этот процесс, в котором использовали плавку на постоянном токе на возду-

хе, обеспечивал более высокое качество металла, чем ОИП, ЭДП, однако вскоре был вытеснен из-за преимущества вакуумной технологии как при вакуумно-индукционной плавке (ВИП), так и при вакуумно-дуговом переплаве (ВДП), а также других способах вторичной обработки электросталей (вакуумирование, ковшевая металлургия, позднее АОД). В это же время, главным образом благодаря работам Б. И. Медовара по применению технологии ЭШП на переменном токе, в бывшем СССР получены существенные результаты при производстве стальных изделий ЭШП высокого качества. Несмотря на очевидный прогресс в создании технологий вакуумной

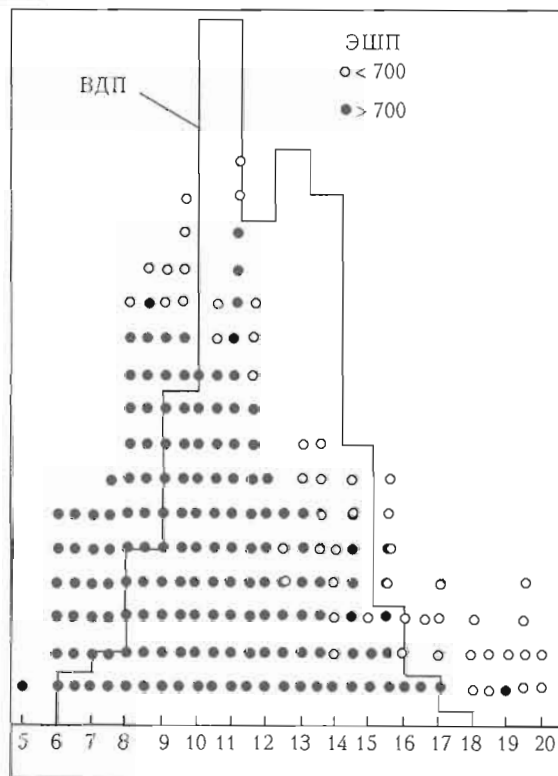


Рис. 1. Общее количество включений (оценка по ASTM 45E) в стали 35 NDC16 для шасси

плавки это стало побудительным мотивом для исследований западных промышленников в области аэрокосмических сплавов.

Ранние разработки в Европе и США способствовали производству небольших партий слитков из сплавов на основе никеля (Нимоники, Хастеллой, Инконели), в которых содержание включений и структура сегрегации были крайне привлекательны, по сравнению с эквивалентными слитками, выплавленными способом ВДП [1].

Дальнейший прогресс требовал создания и внедрения крупных печей ЭШП, что частично было выполнено в результате приобретения советского оборудования и технологии, а также разработки конструкций печей различными компаниями, занимающимися выплавкой специальных сплавов или продажей оборудования ВДП. Производство высококачественных сталей общего назначения наладили очень быстро, но вскоре признали, что требования к аэрокосмическим сплавам — это не просто оценка металлургического качества слитков, полученных в лабораторных условиях. Практическое применение аэрокосмических сплавов сопровождается сложной сетью оценок, контроля качества (Q/C) и гарантий качества (Q/A) [2]. Для того, чтобы использовать сплав, полученный с помощью нового процесса, даже если он является хорошо известным материалом, производитель обязан следовать определенным правилам [3]: сплав должен выплавляться из качественного источника сырья и способом, точно соответствующим установленной практике, последовательно изготовить большое количество слитков (обычно не менее пяти), соответствующих существ-

ующим техническим условиям, а также иметь комплект систем QA/QC и идентификационных систем, приемлемых для пользователя и ответственного авиационного органа [3, 4].

Все указанные системы и материалы должны пройти технический аудит изготовителями поковки и пользователем, а иногда и FAA (US Federal Aviation Act). Очевидно, что для такой системы требуется не только простая проверка механических свойств.

По этой причине внедрение ЭШП для аэрокосмических материалов, уже отвечающим техническим требованиям ВДП, было сложной проблемой, поскольку требовалась оценка не только свойств, но и программы разработки конструкций печей, систем управления и операционных систем. Этот порядок сохранился и до настоящего времени, так как изучение точной роли ЭШП в изготовлении этих ответственных деталей продолжается.

Сложность ЭШП можно проиллюстрировать на примере внедрения способа в процесс изготовления повок шасси из сплавов 300M и 35NCD16 [5]. Значения  $K_{1c}$  для сплава ЭШП, влияющие на его динамическое поведение, оказались выше, чем у сплава ВДП [6, 7]. Эффект обусловлен главным образом разным содержанием включений при этих двух процессах (рис. 1).

Однако экономическое преимущество, заключающееся в улучшении свойств, было недостаточным для возмещения расходов по переквалификации изделия из ВДП в ЭШП. Поэтому стальные поковки продолжают изготавливать из сплава ВДП, несмотря на его худшие свойства. Грядущие изменения в технических условиях вызывают сомнения при использовании титановых сплавов в конкретных деталях. Однако технические условия для сталей неаэрокосмического назначения смогут быть легко изменены в случае применения нового процесса. На различие в содержании включений ЭШП и ВДП применительно к суперсплавам указывали несколько авторов [8–13].

Наиболее эффективным предполагается применение ЭШП в производстве вращающихся деталей, используемых в турбинах крупных промышленных двигателей. Для этого требуется не только крайне высокая степень работоспособности и надежности изделия, но и наличие заготовок большого диаметра. Кроме того, уменьшению стоимости изделий может способствовать последовательность процесса внедрения.

**Структура слитка и последствия нестабильности процесса.** Тепловой баланс печи ЭШП такой же, как и в случае ВДП, но с некоторыми важными различиями. Тепловложение на верхнюю поверхность слитка ЭШП состоит из тепла, передаваемого от нагретого шлака, а также энтальпии потока жидкого металла. В верхней поверхности слитка ВДП тепловложение состоит из теплового эффекта быстро перемещающейся дуги и энтальпии потока жидкого металла [14]. В результате, значения темпера-

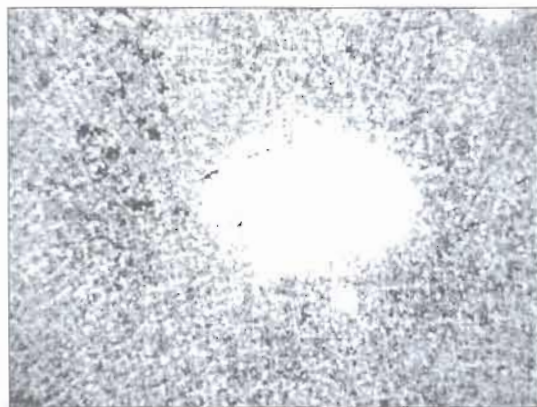


Рис. 2. «Белое пятно» в заготовке IN718 (ВДП),  $\times 100$

туры верхней поверхности одинаковы в двух процессах, но поверхность при ЭШП имеет более устойчивый поток тепла во времени вследствие благоприятного влияния теплоемкости шлака.

Эта разница в процессах означает, что ЭШП имеет меньшую тенденцию к образованию дефектов макроструктуры слитка, возникающих в процессе неустойчивости, таких как «белые пятна» [15] (рис. 2) и дендритные кольца или полосы [16] (рис. 3). Оба эти дефекта указаны в технических условиях, что налагает серьезные ограничения на их присутствие в сплавах для ответственных изделий. Как правило, технические условия допускают наличие небольших областей «белых пятен», не связанных с гроздьями неметаллических включений (чистые «белые пятна»), но отбраковывают сплавы с большими «белыми пятнами» (например, более 2...3 мм в сечении заготовки диаметром 200 мм, предназначенной для повок диска) и особенно, если они грязные. Хотя не зафиксировано ни одного случая разрушения работающей турбины, вызванного усталостной трещиной от «белого пятна».

Существуют проблемы с надежностью этих высоконапряженных деталей из-за дефектов в материале заготовки, обнаруженных с помощью неразрушающего контроля, а также с невозможностью характеризовать дефект с двухмерной протравленной поверхностью. Поэтому необходимы повторные испытания и изучение протравленной поверхности дополнительных сечений, даже если «белое пятно» небольшое и чистое.

«Белые пятна» обнаруживаются в изделиях из суперсплавов ЭШП только в отдельных случаях. Механизмы, отвечающие за их формирование при ВДП, не могут срабатывать при ЭШП, за исключением случаев образования кристаллизационных «белых пятен» одного типа, а также обрушения конца оплавленного электрода.

Показано, что этот последний механизм существует при ЭШП в условиях очень плохого качества электрода из-за пористости в его центральной части в сочетании с низкой нестабильной скоростью плавления. Однако даже в этом случае получающиеся в результате «белые пятна» не только небольшие, но также свободны от неметаллических включений



Рис. 3. Центральная сегрегация в заготовке диаметром 152 мм из суперсплава (ESR)

благодаря растворению включений в виде оксидов в жидком шлаке.

Кристаллизационные «белые пятна» в слитках ЭШП, обычно небольшие и чистые, не вызывают трудностей в производстве. Отсутствие «белых пятен» в изделии хорошо контролируемого процесса ЭШП станет преимуществом в случае использования ЭШП для изготовления вращающихся деталей, хотя и больше экономическим, чем техническим.

Проблема «белого пятна» обнаруживается на стадии производства заготовки с помощью отражений от связанных с ним включений и/или трещин, а также с помощью исследований протравленных поверхностей. Маловероятно, что «белое пятно» того размера и типа, которое может вызвать разрушение при эксплуатации сплава ВДП или ЭШП, не будет учтено при контроле качества.

Однако поскольку в ходе исследования с протравкой дефект обнаруживается только на одной поверхности, любые даже незначительные дефекты следует подвергать дальнейшим исследованиям, что связано с большими экономическими затратами в производственном цикле. Последнее не принимают во внимание во всех отраслях промышленности, кроме аэрокосмической, но оно является крайне важным отличием изделий ЭШП от ВДП. Изделие, не прошедшее испытание на качество в начальной стадии, но требующее частых повторных испытаний и оценок, является экономическим бременем для производителя, даже если заготовка удовлетворяет всем требованиям технических условий. Этот фактор может нарушить баланс между ВДП и ЭШП, исключая все преимущества, и сосредоточить внимание только на прямых эксплуатационных расходах.

Полосчатость и дендритные кольца, в какой-то степени, обнаруживаются практически во всех процессах переплава. Дендритные кольца являются важными с точки зрения металлургии, если можно доказать, что они способны влиять на свойства. В случае с высокопрочными сталями очень ярко вы-



раженные кольца способствуют снижению усталостной долговечности на 10 %, но в общем в этих сплавах процессы гомогенизации, используемые при ковке и термообработке, позволяют устранить незначительные различия в химических составах или, по крайней мере, уменьшают их проявление до той степени, когда они не оказывают явного влияния на свойства.

Такое улучшение происходит, поскольку основными элементами, делающими кольца видимыми при травлении, являются углерод и фосфор; они легко диффундируют при температурах термообработки. У сплавов, для которых изменение состава имеет более значительное влияние, например, на температуру фазового превращения, фазовые равновесия или реакции осаждения, от образования колец будет зависеть качество. Для суперсплавов такими реакциями могут быть осаждение первичных карбидов или образование эвтектической фазы Лавеса. У титановых сплавов это влияние может привести к изменениям локальной температуры фазового превращения и, в конечном итоге, — к изменению локального соотношения фаз в конечном продукте.

В технических требованиях аэрокосмической промышленности, как правило, эта проблема рассматривается на основе качественного фотографического сравнения для определения степени полосчатости относительно стандартных металлограмм, но эта система включает как эффект дендритных колец, так и результат сильной междендритной ликвации, проявляющейся в виде полос в кованой и катаной структуре. Очень важно различать эти два эффекта, поскольку их причины, скорее всего, различны еще на стадии изготовления слитка.

Дендритные кольца образуются в результате неравномерного движения фронта кристаллизации в слитке, что может быть вызвано рядом причин внутри печи, наиболее значительные из которых возникают, когда в процессе ЭШП происходит движение кристаллизатора и слитка относительно друг друга или при смене электрода.

В аэрокосмической промышленности нет спецификации на ЭШП, позволяющей использовать этот тип процесса для конечного продукта. В обычном процессе ЭШП, как правило, отсутствуют резкие изменения тепловых потоков, вызывающих указанный эффект из-за теплоемкости шлака. Однако если процесс выполняется при нестабильных движениях электрода или погружении его в шлак, энергетические изменения, провоцируемые при этом, могут привести к появлению дендритных колец. Тем не менее, изменения можно легко определить по записи процесса, и часть слитка, имеющая такие характеристики, может быть отбракована на ранней стадии обработки до того, как затраты на процесс поднимутся до высокого уровня. Еще одной потенциальной причиной образования дендритных колец в слитках ЭШП является резкое изменение пути тока в ходе процесса, что может привести к образованию отдельных, четко выраженных, колец в

слитке. Данный вопрос является важным, поскольку это явление нельзя четко проследить исходя из записей параметров процесса.

Полосчатость образуется в результате расширения междендритной сегрегации в ходе однонаправленной механической обработки (прокатки или проковки), и она редко бывает симметричной в радиальном направлении. Согласно стандартам аэрокосмической промышленности, в случае серьезных дефектов требуется отбраковка, поскольку в суперсплавах эта полоса будет содержать первичные карбиды с недопустимыми размерами (например, NbC в IN718, TiC в Уаспалло) и вредные фазы ( $\delta$ -фаза в IN718 в соотношении, вызывающем колебания размера зерна) и, возможно, эвтектические фазы Лавеса.

Гранулометрический состав карбида в суперсплавах нельзя изменить значительно при помощи гомогенизирующей обработки, поскольку температура, необходимая для растворения карбида, слишком близка к температуре солидуса сплава для реальных условий обработки.

Долю  $\delta$ -фазы нельзя изменить без значительной высокотемпературной гомогенизации для снижения высоких локальных концентрационных градиентов ниобия. Невозможно удалить эвтектические фазы Лавеса без риска образования локальной ликвации по границам зерен при требуемой температуре. Поэтому полосчатость необходимо устранять еще на стадии затвердевания слитка при помощи соответствующего регулирования таких параметров кристаллизации, как температурный градиент и скорость кристаллизации, чтобы междендритная ликвация находилась на приемлемом уровне.

Таким образом, определяем границы использования процесса ЭШП данных сплавов, поскольку сюда также входят фундаментальные металлургические переменные «нормальной» структуры. Предел достигается, если полосчатость заготовки, появившаяся в результате ликвации в центре, превышает допустимые границы.

Процесс ЭШП обещает быть более стабильным чем ВДП и, следовательно, позволит изготавливать слитки, менее склонные к образованию дефектов вследствие нестабильности. Это предположение было темой различных опытных проектов, выполняемых с целью квалификации ЭШП как процесса, которому следует отдавать предпочтение при изготовлении авиационных двигателей. Однако основным аргументом при сравнении является сочетание его потенциальных преимуществ с требуемым получением «нормальной» металлургической структуры слитка, в соответствии со спецификациями аэрокосмической промышленности.

*«Нормальная» структура слитка.* У процесса ЭШП сложный тепловой баланс. Коэффициент теплопереноса по оси слитка зависит от толщины шлаковой корки и задается температурой шлака, которая в свою очередь определяется сочетанием гео-



метрии слитка, химического состава шлака, а также скоростью плавления.

Для удовлетворения требований микро- и макросегрегации и получения структуры, соответствующей требованиям стандартов на вращающиеся детали из суперсплавов, необходимо уменьшить максимальный диаметр слитка приблизительно до 450...500 мм. Если этот диаметр превышен, то получим область режима теплопереноса, в которой любая скорость плавления не обеспечит достаточно малое время локального затвердевания для образования необходимой мелкозернистой структуры [17–19].

Данное ограничение означает, что «устойчивый» процесс, т. е. процесс с достаточно широким диапазоном эксплуатационных параметров, можно осуществить только для слитков диаметром менее 450 мм в случае более чувствительных сплавов (например IN718), 500 мм — для менее чувствительных (например, Уаспаллой с низким содержанием титана) и очень маленького диаметра — для склонных к сегрегации сплавов с высоким содержанием  $\gamma$ -фазы (например Рене 95).

Поскольку на практике для большинства кованых деталей требуются заготовки диаметром 200 мм, могут возникать проблемы в процессе дальнейшего передела слитков с целью обеспечения требуемой рекристаллизации и получения мелкозернистой структуры.

Если процесс осуществляют на слитке предельного диаметра в условиях, где даже небольшие отклонения от идеальных параметров могут привести к нарушению жестких границ оптимального процесса, появляется риск образования структурных аномалий в материале, в основном сегрегация.

При достаточно жестких требованиях к качеству в аэрокосмической промышленности это создает несколько критических проблем, прежде всего с обнаружением дефектов при неразрушающем контроле. Если сегрегация является достаточно сильной и может вызвать образование областей хрупкости в микроструктуре (путем выделения, например, фазы Лавеса или больших карбидов), которые в результате последующей деформации формируют довольно большие трещины, обнаруживаемые при помощи ультразвука, то нужно установить критерий отбраковки этой части заготовки.

Для отбраковки всего слитка требуется показание ультразвукового контроля и наличие трех дефектов размерами более 800 мкм в заготовке. Важной является и оценка макроструктуры, выполненная при помощи протравленного шлифа поперечного сечения в соответствующей точке. Если параметры процесса хотя бы незначительно изменялись, что способствовало периодической сегрегации по длине слитка, то результаты контроля по выборочным поперечным сечениям заготовки могут быть недостаточно надежными. Это является характерной особенностью всех процессов передела, поэтому в аэрокосмических методиках квалификации следует делать акцент на записи процессов и их оценке, а

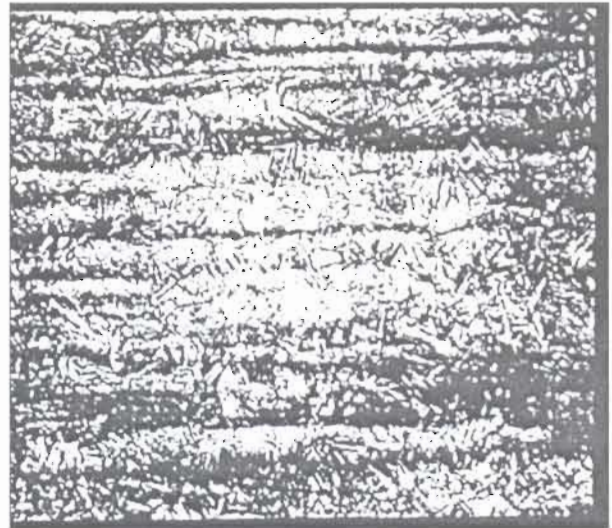


Рис. 4. Полосчатость в заготовке ЭШП из мартенситно-стареей стали прочностью 300 ksi,  $\times 100$

также на системы контроля процесса. Для промышленности главное правило состоит в том, что «качество нужно обеспечивать при помощи управления процессом, а не контролем изделия».

При разработке программ обнаружили, что если процесс ЭШП использовать для изготовления слитка заданного сплава предельного или почти предельного диаметра, то он будет склонен к небольшим отклонениям в условиях затвердевания, при которых в слитке появляются участки с недопустимой сегрегацией. Такое беспорядочное появление так называемой центральной сегрегации [20, 21] (рис. 4) является основной причиной, по которой изделия ЭШП не используются широко в аэрокосмической промышленности.

При ЭШП также создаются определенные проблемы в случае обнаружения небольших отклонений в процессе. Подобно ВДП, процесс ЭШП является электрически «шумным» и поэтому трудно точно измерить небольшие отклонения в скорости плавления, расположении электрода, если не использовать сложные программы усреднения сигналов датчиков с шумами.

Небольшое отклонение в виде маленького кусочка электрода, падающего непосредственно в ванну слитка, регистрируется в этих системах только как изменение в средней скорости плавления и, следовательно, его трудно определить. Можно было бы выполнить более точный оперативный анализ компонентов усредненных расчетов, но этот вариант еще не реализован. Еще более сложным является контроль путей тока.

Электрический ток разделяется между шлаком и кристаллизатором, и это является основной составляющей факторов, определяющих профили температуры, и следовательно, затвердевания в слитке. Если распределение тока изменяется, в слитке изменяется профиль локального затвердевания. Возможность измерить это распределение в оперативном режиме еще не установлена. Контроль распределения, видимо, представляет собой очень точное



сбалансированное сочетание условий пуска и контроля стационарного погружения электрода в шлак в установившемся режиме. Опыт показывает, что большие проблемы с центральной сегрегацией и, в итоге, с пятнистостью могут возникать из-за недостаточного контроля этого отклонения, что является постоянным препятствием для использования процесса ЭШП для изготовления ответственных деталей.

*«Трехступенчатый» процесс плавления.* Процесс ЭШП позволяет изготавливать сплавы более чистые, в отличие от получаемых при помощи других способов. Дело в том, что ЭШП используется в последовательности, называемой «трехступенчатым плавлением» [22, 23]. Указанный комбинированный процесс является попыткой объединить наилучшие характеристики ЭШП и ВДП для того, чтобы улучшить качество продукции.

Эта последовательность заключается в вакуумном индукционном плавлении, за которым следует ЭШП, а затем ВДП (ВИП + ЭШП + ВДП). Такая комбинация может показаться дорогостоящей, однако присутствуют некоторые аспекты, способствующие снижению себестоимости. Во-первых, поскольку при ЭШП допускается более низкое качество электрода, чем при ВДП, условия отливки и отжига электрода здесь не настолько строги, как для ВДП. Хотя электрод должен быть прочным и свободным от внутренних напряжений для предотвращения растрескивания и фрагментации при плавлении, допускаются незначительная центральная пористость и существенная микросегрегация. Во-вторых, поскольку в процессе ЭШП хорошо удаляются тугоплавкие и шлаковые включения, можно свести до минимума использование сложных фильтров и разливочных устройств в ВИП, а также выполнять некоторую десульфурацию при помощи шлака. Кроме того, процесс ЭШП можно осуществлять при большей скорости плавления, чем ЭШП слитка без сегрегации.

Затем следует процесс ВДП с использованием слитка ЭШП со снятыми напряжениями в качестве электрода, что значительно улучшает управление процессом благодаря применению стандартной методики мелкокапельного переноса металла.

Отсутствие раковин в электроде, больших макросегрегаций или шлаковых включений обеспечивает лучшую воспроизводимость поведения дуги и, таким образом, более точный контроль зазора между электродом и слитком, что способствует получению контролируемой микро- и макроструктуры слитка.

Несколько увеличивается стоимость в результате применения дополнительной обработки поверхности ЭШП слитка перед ВДП, а также при необходимости точно контролировать химический состав на стадии ЭШП. Вся последовательность процесса является менее затратной, чем альтернативных схем (порошковой металлургии), не требуется длительных процедур согласования при аттестации деформируемых сплавов.

Процесс «трехступенчатого» передела позволяет значительно улучшить качество ответственных деталей. Однако следует отметить, что это улучшение касается не фундаментальных статических свойств сплава (прочности или пластичности), а динамических, связанных с усталостной долговечностью и скоростями роста трещины. Диски турбины, изготовленные по схеме ВИП + ВДП, применяемые в гражданской авиации, сейчас, как правило, заменяют из-за малоциклового усталости после приблизительно 4000 циклов. Этот срок составляет менее 25 % теоретического срока службы детали из суперсплава, определенного при помощи расчетов, включающих отдельную характеристику вероятного распределения дефектов в процессе производства.

Вследствие снижения содержания включений и более контролируемой микроструктуры металла в изделии после тройного передела можно уменьшить ограничения по сроку службы и увеличить эксплуатационную долговечность детали. Если полученное сокращение текущего ремонта и простоя промышленных авиационных двигателей сопоставить с предельным увеличением стоимости процесса тройного передела, то, очевидно, результат является экономически жизнеспособным. Большинство моторостроителей во всем мире приняли эту схему в качестве стандартной, и объем промышленного использования ЭШП за последние годы значительно увеличился.

Необходимо отметить, что сочетание упомянутых факторов свидетельствует о том, что сплавы ЭШП можно использовать непосредственно для производства вращающихся деталей в авиадвигателях, если только выплаваемый слиток ЭШП по размеру намного меньше пределов, налагаемых критерием нормального плавления. В этих условиях при надлежащем контроле он будет соответствовать определению надежного процесса. Следовательно, слиток потенциально и фактически пригоден для изготовления небольших двигателей и в данный момент ЭШП суперсплавов используют в ограниченном масштабе.

Слиток можно использовать при изготовлении статических деталей (например, корпуса или камеры сгорания), если они не являются такими ответственными, как вращающиеся, а форма деталей такая, что структуры дефектов, описанных выше, не являются проблемой. Однако большие гражданские двигатели имеют намного больший рынок, и именно в этой области ЭШП находит наиболее удачное применение в схеме «трехступенчатого» передела.

*Применение ЭШП для титановых сплавов.* Вращающиеся детали, изготовленные из титана, являются наиболее ответственными изделиями для гражданской авиации, несмотря на проблемы с обнаружением дефектов в этих сплавах, а также существенные металлургические недостатки из-за высоких скоростей роста в них трещин. К тому же, диск вентилятора является наиболее тяжелой вра-



щающейся частью двигателя и, следовательно, представляет наибольший потенциальный риск появления опасного повреждения. К сожалению, такие повреждения были зафиксированы в некоторых случаях в гражданской авиации. Это привело к значительному снижению срока службы двигателей.

Основной металлургической проблемой являются так называемые тяжелые  $\alpha$ -частицы [24], представляющие собой обогащенную азотом область  $\alpha$ -фазы, размеры и свойства которой создают предпосылки для начала образования трещины в детали. Наиболее опасные варианты дефектов зарождаются в титановой губке, используемой в производстве сплава, хотя установлены 25 других источников в схеме стандартного трехкратного процесса ВДП [25]. Для обеспечения удаления дефекта из сплава технологический процесс изменен с трехкратного ВДП на электронно-лучевую плавку с холодным подом (ЭЛПХП) + ВДП большинством производителей двигателей и успешно. Последний этап ВДП сохранен для контроля макроструктуры слитка.

Однако схема с ЭЛПХП является достаточно дорогостоящим процессом. Высказано предположение [26–28], что ЭШП мог бы обеспечить упомянутое преимущество благодаря потенциальной возможности растворения титановых частиц, богатых азотом, в соответствующем шлаке. В этом случае в ЭШП можно было бы заменить современную схему плавления губки на первом этапе изготовления слитка с последующим ВДП, а также сделать заключительным процессом изготовления слитка для титановых сплавов, не предназначенных для авиационно-космической промышленности.

Химический аспект процесса остается непонятным, поскольку  $\text{CaF}_2$  (используемый для расплавления титана) не растворяет  $\text{TiN}$ , а процесс его удаления основывается на разложении  $\text{TiN}$  при помощи добавок в шлак металлического кальция с использованием его способности растворяться в  $\text{CaF}_2$  при высоких температурах. Плотность тока электрода, необходимая для поддержания жидкой пленки на титановом электроде, выше, чем базовая плотность обменного тока на поверхности раздела  $\text{Ti}-\text{CaF}_2$ . Требуемая мощность для ЭШП достаточно высока для поддержания мягкой дуги на поверхности электрода, что делает эту схему более близкой к дугошлаковому процессу, чем к стандартному ЭШП относительно характеристик теплопереноса. Предложено использовать неплавящиеся электроды во избежание стадии уплотнения губки, что еще больше усложняет анализ процесса. Пока неясно, можно ли использовать эту версию ЭШП с титановыми сплавами, предназначенными для вращающихся деталей.

## Выводы

1. Установлено, что даже при интенсивных конструкторских работах ЭШП нельзя экономично ис-

пользовать для суперсплавов, применяемых в элементах больших вращающихся деталей.

2. Для создания удовлетворительной микро- и макроструктуры готовой детали требуется слиток такого диаметра, который нельзя трансформировать в необходимый диаметр заготовки.

3. Установлено, что процесс лучше всего использовать как способ подготовки электрода для ВДП, поскольку объединяются наилучшие характеристики обоих процессов. В этом режиме ЭШП делает значительный вклад в улучшение рабочих характеристик широкого диапазона авиационных двигателей.

4. Использование ЭШП при изготовлении титановых сплавов для аэрокосмической промышленности все еще находится на стадии ранних разработок и его потенциал еще предстоит изучить.

1. Kelly T. N., Klein H., Sun R., Venal W. // Proc. 5th Intern. symp. on electrosag technologies. — Pittsburgh, USA, 1974. — Part 1. — P. 150–180.
2. For example, PWA Specification 370, Pratt & Whitney Aircraft Engines Corp.
3. US Federal Aviation Act, 1958.
4. Koenig R. J. // Proc. conf. on electron beam melting. — NJ USA, 1991. — P. 27–31.
5. Rayne D., Gavart A., Rambaud J. B. // Materiaux et Techniques. — 1981. — P. 359–366.
6. Harris D., Priest A. H. // Technical Report PROD/EM/1/79. — 1979.
7. Skylstad K. J. // Report A-5530-KJS-379. — 1980.
8. Wegman D. D. // Superalloys 1998. — 1988. — P. 427–436.
9. Fu J., Zhao J. H., Wang H., Xu G. Y. // Proc. 9th Intern. vacuum metallurgy conf. — 1988. — P. 722–732.
10. Zhengbong Li. // Ibid. — P. 732–744.
11. Xie X. S., Fu J., Gao L., Liu X. K. // Ibid. — P. 744–756.
12. Menzies R. G., Adaszczik C. B. // Proc. 8th Intern. conf. on vacuum metallurgy. — 1986. — P. 65–73.
13. Choudhury A. // ISIJ. — 1982. — 32 (5). — P. 563–574.
14. Ballantyne A. S. // PhD Thesis University of British Columbia, 1974.
15. Jackman L. A. et al. // Superalloys 71, 625 and 706. — 1994. — P. 153–167.
16. Rao A. V. // PhD Thesis. — Michigan State University, 1973.
17. Ballantyne A. S., Mitchell A., Wadier J.-F. // Proc. 6th Intern. vacuum metallurgy conf. — New York, 1979. — P. 599–623.
18. Zanner F. J., Williamson R. L., Harrison R. // Proc. 9th Intern. vacuum metallurgy conf. — 1988. — P. 551–568.
19. Yu K. O., Domingue J. A. // Superalloy 718. — P. 33–48.
20. Evans M. D., Krzyzanski G. E. // Superalloys 1988. — 1988. — P. 91–100.
21. Evans M. D. // Proc. 8th Intern. vacuum metallurgy conf. — New York, 1986. — P. 125–131.
22. Patel S. J., Siddall R. J. // Proc. Intern. conf. on liquid metals. — 1994. — P. 318–325.
23. Petit P., Fesland J. P. // Superalloys 718, 625 and 706. — 1997. — P. 141–153.
24. Mitchell A. // Titanium '98. — 1998. — P. 91–104.
25. Shamblen C. F., Hunter G. B. // Proc. 10th Intern. vacuum metallurgy conf. — 1989. — P. 3–11.
26. Medovar B. I., Medovar L. B., Tsukolenko A. K., Chernets A. V. // Proc. Intern. conf. on liquid metals. — 1999. — P. 168–176.
27. Beall R. A., Calvert E. D., Clites P. G., Dunham J. T. // Proc. 1st Intern. symp. on electrosag technology. — Pittsburgh, 1967. — P. 1–19.
28. Gurevich S. M. et al. // Avtom. svarka (in English). — 1963. — 16. — P. 27–33.

Ун-т Британ. Колумбии, Ванкувер, Канада

Поступила 05.10.2008