



титана ТГ100 ее максимальное содержание в атмосфере печи возрастает от 30 до 60 млн⁻¹ при увеличении тока на плазмотронах от 600 до 1600 А. Аналогичные зависимости получены при переплаве прессованных заготовок со сроками хранения 1... 4 суток. При изменении скорости перемещения прессованной заготовки в зону плавки от 2 до 7 мм/мин максимальное содержание влаги возрастает в пределах 32... 53 млн⁻¹.

Анализ поведения микропримесей влаги при плазменной плавке показал, что самым эффективным способом уменьшения количества влаги, как и водорода, является подача большого количества чистого плазмообразующего газа.

1. Плавка и литье титановых сплавов / А. Л. Андреев, Н. Ф. Аношкин, К. М. Борзцовская и др. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.

2. Лакомский В. И. Плазменно-дуговой переплав. — Киев: Техника, 1974. — 383 с.
3. Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Курапов Ю. А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1973. — 237 с.
4. Клайтес П. Дж. Индукционно-шлаковый переплав // Вакуумная металлургия. — М.: Металлургия, 1973. — С. 93–103.
5. Применение плазменно-дуговой технологии при выплавке слитков титана из отходов титанового производства / Ю. В. Латаш, В. С. Константинов, П. Н. Галкин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1985. — № 3. — С. 65–70.
6. Григоренко Г. М., Константинов В. С. Взаимодействие водорода с жидким титаном при плазменной плавке // Там же. — 1979. — № 8. — С. 97–101.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
КП «Запорожский титано-магниеый комбинат»

Поступила 14.10.2004

УДК 669.187.58:002.5

ПРИМЕНЕНИЕ ДОННОГО СЛИВА ПРИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ ГАРНИСАЖНОЙ ПЛАВКЕ

В. А. Шаповалов, Ю. А. Никитенко, В. Р. Бурнашев

В статье рассмотрены возможности применения донной разливки металла при использовании огнеупорных керамических материалов и плазменно-дуговой плавке в медном водоохлаждаемом тигле, а также защиты медного тигля от воздействия прямого плазменного потока.

The article describes feasibility of application of a bottom pouring of metal in use of refractory ceramic materials and plasma-arc melting in a copper water-cooled crucible, and also protection of copper crucible from the action of direct plasma flow.

Ключевые слова: огнеупоры; плазменно-дуговая плавка; гарнисаж; медный водоохлаждаемый тигель; аморфные и микрокристаллические металлы

В современной металлургии существует множество способов разливки сталей и специальных сплавов, одним из которых является донный слив. К основным недостаткам этого способа следует отнести применение затворного устройства, значительно усложняющего конструкцию и эксплуатацию печи. Преимущество донного слива по сравнению, например, с разливкой с наклоном емкости или с промежуточной емкостью, заключается в разливке металла из центра жидкой ванны, что способствует снижению содержания неметаллических включений в отливке, т. к. при переливе металла через край плавильной емкости возможно запутывание некоторого количества шлака и оксидных плен в жидком металле, приводящее к неоднородности слитков и разного типа дефектам.

В настоящей работе донную разливку металла на барабан-холодильник применили для получения тонких лент с аморфной и микрокристаллической структурой (метод спиннингования) с целью умень-

шения расстояния от расплава до барабана-холодильника до минимального. Такая технологическая схема позволяет исключить образование кристаллических зародышей в расплаве и улучшить условия аморфизации. Расположение разливочного сопла в нижней части жидкой ванны обеспечивает непрерывность подачи расплава под избыточным давлением газа и собственной силы тяжести и, следовательно, неразрывность потока. Толщина ленты, а также свойства продукции во многом зависят от жесткости конструкции и величины зазора между разливочным соплом и барабаном-холодильником [1]. Собственно процесс спиннингования заключается в расплавлении металла, «продавливании» его под избыточным давлением инертного газа через формообразующую щель на барабан-холодильник и сверхбыстрой закалке. В мировой практике [2, 3] для получения такого типа продукции применяют тонкостенную ампулу из огнеупорной керамики, чаще всего кварца, помещенную в электромагнитное поле индуктора.

Материалы, с которыми соприкасаются жидкие металлы в плавильной емкости, можно разделить на оксидные, карбидные и металлические.



Таблица 1. Свойства некоторых оксидных материалов, используемых в плавильных емкостях

Параметр	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	ZrO ₂	3Al ₂ O ₃ + 2SiO ₂
T _{пл.} , °C	1730	2800	2050	2980	2440	2700	1830
T _{разм.} , °C	1400	2000	1950	2400	2000	2500	1750
ρ, кг/м ³	2,30	3,60	3,90	3,32	5,21	5,60	3,16
λ _{1000 °C} , Вт/(м·К)	0,0038	0,0860	0,0540	0,3640	–	0,0046	0,0129
КЛТР _{25...1000 °C} · 10 ⁻⁶ , °C ⁻¹	13,9	11,4	8,0	13,9	–	7,2...8,1	5,5

Взаимодействие с оксидными материалами. Эти материалы (табл. 1) могут состоять из чистых тугоплавких оксидов или смеси оксидов. Основным критерием выбора того или иного огнеупора является его температура плавления и размягчения, причем, у огнеупоров, состоящих из нескольких компонентов, эти температуры ниже, чем у чистых оксидов. С температурой плавления связана полная потеря прочности материала, с температурой размягчения — возникновение деформации формы при напряжении 0,2 МПа. Как показывает практика, температура размягчения огнеупорной керамики является одним из главных критериев при выборе обрабатываемых сплавов. При работе огнеупоров на предельных температурах нарушается жесткость конструкции, а на заключительном этапе спиннингования, когда в разогретую ампулу резко подается избыточное давление газа, это может привести к ее разрыву. При высоких температурах увеличиваются также габаритные размеры ампулы из-за суммарного коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР), что нарушает тонкие настройки процесса и делает слив плохо контролируемым. Повысить жесткость конструкции можно за счет увеличения толщины стенок ампулы, но это в зависимости от магнитной проницаемости материала повышает энергозатраты. Оксидные материалы обладают довольно низкой теплопроводностью, и быстрый нагрев металла в электромагнитном поле индуктора приводит к расширению внутренней поверхности без изменения внешних размеров и, как следствие, к растрескиванию и разрушению ампулы.

Недостаточная огнеупорность материала является одной из причин механического разрушения футеровки и загрязнения расплава крупными инородными частицами неметаллических включений, которые в данном случае называют экзогенными, подчеркивая их внешнее по отношению к расплаву происхождение.

При использовании огнеупорных материалов сталкиваются с такими не менее важными проблемами, как их реакционная способность и образование неметаллических включений в расплаве. К наиболее опасным относится взаимодействие металлических расплавов с оксидными огнеупорными материалами по реакции $Me + RO = MeO + R$. Восстановленный элемент растворяется в металлическом расплаве и загрязняет его. Образующийся оксид

металла может растворяться в расплаве, оставаться в свободном виде или же образовывать сплав с огнеупорным оксидом. Подобное взаимодействие имеет место при попытке плавить магниевые сплавы на оксидной футеровке, содержащей оксид кремния SiO₂. В результате, как известно, разрушается футеровка и загрязняется расплав.

Большую роль во взаимодействии расплавов с огнеупорными материалами играет явление смачивания, которое обычно предшествует химическому взаимодействию. Чистые металлы при отсутствии химического взаимодействия с огнеупорными оксидами смачивают их плохо. Химическое взаимодействие расплава с футеровкой и смачивание ее расплавом вызывают так называемую металлизацию футеровки. Это явление заключается в том, что, если расплав химически не реагирует с футеровкой, металлизация происходит только за счет пропитывания пористой футеровки расплавом. Внешне это выражается в том, что прилегающий к расплаву слой футеровки меняет свой цвет и значительно возрастает его физическая плотность. Если между расплавом и оксидной футеровкой возможна химическая реакция, межфазная энергия снижается до нуля, соответственно уменьшается поверхностное натяжение и происходит самопроизвольное втягивание расплава в поры.

Взаимодействие металлического расплава с оксидной футеровкой может сопровождаться и таким явлением, как разъедание футеровки, которое объясняется появлением жидкого сплава оксида металла MeO с оксидом футеровки RO. Появление такого жидкого сплава возможно, если в системе MeO–RO имеется область легкоплавких составов, а плавка ведется при температурах, превышающих их точки плавления. Для предупреждения разъедания футеровки необходимо подбирать такой материал для плавильной емкости, чтобы температура плавки была значительно ниже не только точек плавления оксидов огнеупорного материала, но и возможных эвтектических температур в системах MeO–RO.

Взаимодействие с графитовыми, карбидными и металлическими материалами. Графит сам по себе работоспособен при температуре до 2500 °C, однако на воздухе, начиная с 600...700 °C, он очень быстро сгорает, а в вакууме испаряется при температуре выше 2200 °C. Главная особенность графитовых материалов состоит в возможном растворении углерода в металлических расплавах. Графитовые огне-



Таблица 2. Свойства некоторых карбидных материалов, используемых для футеровки

Параметры	TiC	ZrC	SiC	NbC	V ₄ C
T _{пл.} , °C	3257	3530	2205	3613	2450
ρ, кг/м ³	4,93	6,72	3,20	7,56	2,50
λ _{1000 °C} , Вт/(м·К)	0,041	0,049	0,019	0,034	0,07...0,20
КТТР _{25...1000 °C} · 10 ⁻⁶ , °C ⁻¹	7,95	7,01	4,74	7,21	4,50

упоры вполне пригодны для плавки легкоплавких металлов, включая медь и ее сплавы, однако для долговременной работы необходимо защищать их от окисления начиная с 600 °C.

Карбиды переходных металлов (табл. 2) относятся к классу металлоподобных тугоплавких соединений, являются классическими представителями группы фаз внедрения, в которых атомы углерода помещаются в пустотах между атомами металла, плотно упакованными в решетки с кубической или гексагональной симметрией. Они обладают высокими температурами плавления, металлической проводимостью, низкой скоростью испарения при высоких температурах, но на воздухе и в других окислительных газовых средах легко разрушаются при температуре выше 500...600 °C. Карборундовые материалы состоят на более чем 80 % из карборунда — карбида кремния SiC, остальной состав — связка из тугоплавких оксидов. Эти материалы достаточно огнеупорные (выше 1800 °C), химически стойкие (в атмосфере воздуха до 2000 °C включительно), они слабо смачиваются и трудно взаимодействуют с жидкими металлами.

Из металлических материалов, используемых для изготовления плавильных емкостей, широко применяют только сталь и чугун. Понятно, что плавильные тигли из этих материалов можно использовать лишь для литья металлов и сплавов с температурой плавления, соизмеримой с температурой плавления железа. Одновременно необходимо считаться и с возможностью растворения железа в расплаве, сведения о котором можно получить из диаграмм состояния систем железо—расплавляемый металл.

Плавка в гарнисажном тигле. Проблема прямой окислительно-восстановительной реакции между расплавленным металлом и огнеупорной футеровкой становится практически неразрешимой в случае применения тугоплавких металлов, начиная с титана. Все тугоплавкие металлы IV–VI групп периодической системы настолько активны по отношению к кислороду, что никакие огнеупорные оксиды не выдерживают воздействия их расплавов.

Высокая активность в сочетании с большой тугоплавкостью этих металлов вынуждает обращаться к особому способу плавки с применением водоохлаждаемых плавильных тиглей, играющих одновременно роль изложниц-кристаллизаторов, и к таким мощным источникам нагрева, как плазменно-дуговой и электронно-лучевой. В таких плавильных ус-

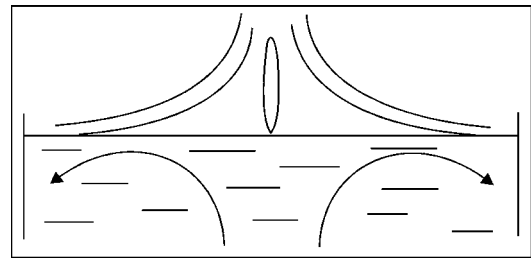


Рис. 1. Перемешивание ванны жидкого металла при плазменно-дуговой плавке

тановках огнеупорные материалы отсутствуют. Расплав контактирует с твердой коркой, нарастающей на металлической поверхности, охлаждаемой с противоположной стороны водой. Рабочие стенки кристаллизаторов выполняют обычно из меди. Благодаря водяному охлаждению медная стенка на рабочей поверхности нагревается до 300...400 °C, поэтому металлический расплав, соприкасаясь с такой «холодной» стенкой, сразу затвердевает, образуя так называемый гарнисаж. Плавка ведется без прямого соприкосновения расплава с медной рубашкой [4].

В нашем случае при плавке в медном водоохлаждаемом тигле не удалось полностью избежать взаимодействия расплава с огнеупорами, т. к. слив осуществляется через сменное керамическое сопло. Однако применение огнеупорной керамики в таком исполнении позволило значительно сократить площадь контакта расплава с огнеупором, сохранив при этом жесткость конструкции. Минимальный размер стенки сопла (5 мм) дал возможность снизить также общее линейное расширение при нагреве. Применение плазменно-дугового источника нагрева позволяет проводить плавку в защитной атмосфере инертного газа и одновременно рафинировать расплав от неметаллических включений.

Огнеупорный материал для изготовления вставки-сопла подбирается из условий его термостойкости и степени реакционного взаимодействия с расплавом. В идеальном случае расплавленный металл не должен смачивать керамику и образовывать с ней химические соединения, но поскольку обрабатываемые сплавы имеют сложные составы и керамики состоят из нескольких огнеупорных соединений, это практически невозможно.

Различного рода взаимодействия между расплавом и соплом приводят к размыванию щели. Вследствие этого изменяется форма, количество истекающего расплавленного металла и, следовательно, появляются дефекты формы ленты типа неровностей поверхности и кромок, застывания капели, разнотолщинности как по ширине, так и по длине.

Нагрев металла сверху мощным источником вызывает в ванне естественные конвективные потоки, отводящие от ее поверхности нагретые массы и подводящие более холодные из глубинных слоев. Водоохлаждаемый тигель и динамический напор газа еще больше способствуют образованию макропотоков в расплаве, которые и определяют форму ванны (рис. 1), поэтому тигель стараются делать большого

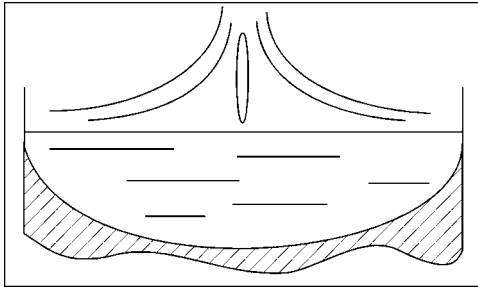


Рис. 2. Неполное проплавление металла по вертикальной оси

диаметра, чтобы увеличить площадь возможного контакта плазменного факела с ванной расплавленного металла.

Влияние объема тигля на коэффициент слива жидкого металла (отношение массы слитого металла к массе всего расплавленного металла) при оптимальной удельной тепловой мощности достаточно подробно рассмотрено в работе [5]. Для поддержания оптимального объема жидкого металла и обеспечения требуемого его перегрева коэффициент формы тигля, который определяется как отношение глубины тигля к его диаметру, был выбран равным 0,2... 0,4. Данное устройство дало возможность получать чистый металл, поддерживать стабильный зазор между срезом сопла и поверхностью барабана-холодильника при накоплении значительных объемов жидкого металла, а также постоянную скорость истечения металла. Чрезмерное увеличение поперечных размеров тигля приведет к замораживанию металла возле стенок тигля или вообще к невозможности расплавить металл, соприкасающийся с холодными стенками.

Передача тепловой энергии в жидком металле осуществляется сверху вниз с большой площади, поэтому ванна расплавленного металла получается мелкой относительно ширины. Следовательно, нецелесообразно делать и тигель глубоким, иначе образуется твердая корка металла на дне ванны и слив металла через донную часть станет невозможным (рис. 2). Чтобы повысить коэффициент слива, тигель делают также в форме предполагаемой ванны с закругленным дном (рис. 3), что дает более равномерное распределение температуры и полное расплавление металла.

С другой стороны, такой мощный источник нагрева, как плазменно-дуговой, может стать причиной оплавления самого медного тигля при полном сливе расплава. В дальнейшем это приведет к загрязнению расплавленного металла медью и к



Рис. 4. Оптимальное сечение водоохлаждаемого тигля при плазменно-дуговой гарнисажной плавке с донным сливом

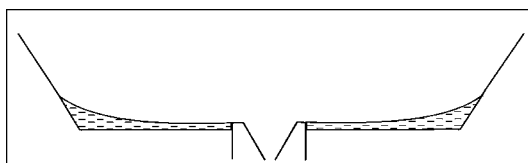


Рис. 5. Способ защиты дна тигля от оплавления путем равномерного распределения неслитого металла

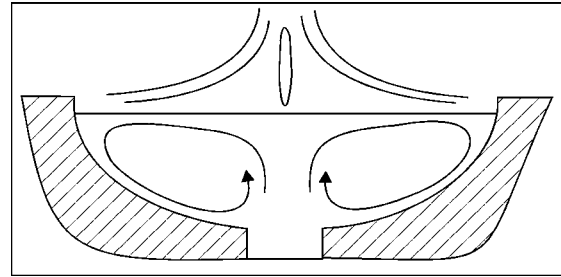


Рис. 3. Округлая форма гарнисажного тигля

необходимости замены тигля. В противном случае при последующем использовании такого тигля и многократных оплавлениях рабочей поверхности может произойти прожог каналов водоохлаждения и авария.

Существует один, и очень простой, способ защиты тигля — частичный слив металла, при котором дуга горит на расплавленный металл, не причиняя вреда тиглю. Но для плавки и разливки небольших объемов металла, когда слив длится несколько секунд, довольно трудно уловить момент, когда надо прекратить слив или отключить плазматрон. Автоматическое отключение источника в тот момент, когда на дне тигля еще остался металл, осуществить достаточно сложно из-за незначительного изменения энергетических параметров и скорости процесса слива, поэтому отключение приходится выполнять вручную, что может привести к аварии.

Мы выбрали другое решение этой проблемы — дно тигля было выполнено плоским (рис. 4). Это привело к частичному замораживанию металла в углах тигля и уменьшению коэффициента слива (рис. 5), но позволило гарантированно оставлять часть неслитого металла и защитить днище тигля. Для жидкотекучих сплавов сливные сопла делают более высокими, в результате чего слив прекращается автоматически, когда уровень расплава опустится до сопла (рис. 6), и тем самым полностью защищается дно тигля.

Таким образом, использование керамических материалов в качестве плавильных емкостей сопряжено с рядом трудностей, которых можно избежать при плазменно-дуговой плавке. Применение плазменно-дугового нагрева и холодного тигля обеспечивает полный прогрев металла и стабильный слив, а также позволяет рафинировать металл от неметаллических включений в контролируемой атмосфере. Проблемы, связанные с плазменно-дуговой плавкой и защитой плавильного тигля, достаточно просто решаются путем выбора оптимальных геометрических размеров тигля, которые делают донную разливку контролируемой и безопасной.

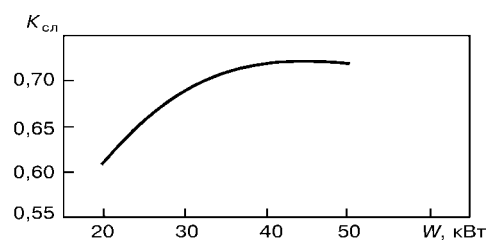


Рис. 6. Зависимость коэффициента слива $K_{сл}$ от мощности плазматрона W для сплава 10HCP

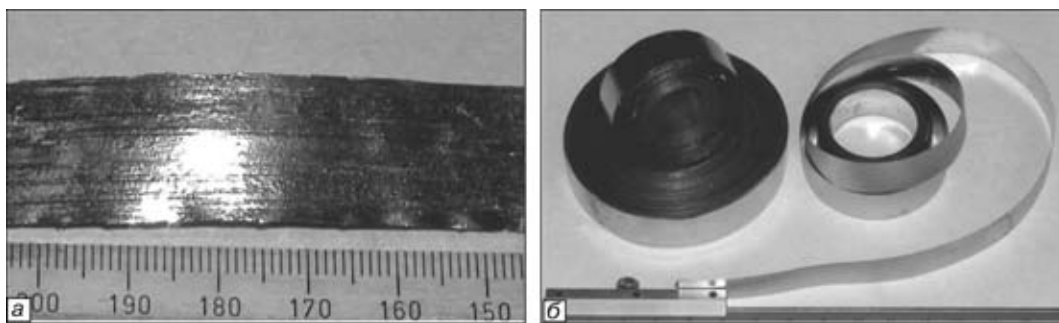


Рис. 7. Внешний вид лент, полученных из сплавов 10НСР (а) и ПН-88 (б)

В основе получения качественных лент, проволок, чешуек лежит точное представление и понимание процесса плавки, знание физико-химических свойств металла и материала сопла. Определяющими факторами, как правило, являются литейные свойства обрабатываемого сплава: температура плавления, жидкотекучесть и склонность к пленообразованию. Немаловажными параметрами являются также смачиваемость керамики расплавом и протекающие при этом физические и химические процессы. От этих характеристик металла зависят и все остальные технологические параметры плавки и слива: ширина щели, высота зазора, число оборотов барабана, избыточное давление в камере при сливе и другие.

Основной областью применения аморфных и микрокристаллических лент является производство труднодеформируемых хрупких припоев, которые сложно получать в виде прокатной продукции обычными методами обработки давлением, поэтому для пайки их используют в виде порошков или достаточно крупных отливок. Методы сверхбыстрой закалки позволяют решить сразу четыре важные проблемы: производство удобных для применения в процессе пайки лент и проволок; фиксация различных пропорций компонентов и сохранение неравновесного состава в твердом состоянии; равномерное распределение легирующих компонентов по всему сечению ленты; получение аморфной

структуры, необходимой для повышения качества паяных соединений.

Технология плазменно-дуговой гарнисажной плавки с донным сливом позволяет получать аморфные и микрокристаллические ленты с довольно широкой номенклатурой составов. В качестве примера на рис. 7 представлены ленты, полученные из сплава 10НСР и хрупкого припоя на никелевой основе ПН-88 толщиной 50...60 мкм и шириной 15 мм.

1. *Плазменно-дуговая установка для производства ленты из аморфных материалов* / Г. Ф. Торхов, В. К. Грановский, Н. В. Рейда и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 2. — С. 78–80.
2. *Rapid solidification techniques applied to the preparation of shape memory alloys* / P. Qchin, A. Dezellus, Ph. Plaindoux et al. // Металлофизика и новейшие технологии: Спец. выпуск. — 2001. — Т. 23. — С. 83–92.
3. *Получение аморфных и нанокристаллических материалов с применением плазменно-дугового нагрева* / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. Ф. Торхов и др. // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 29–35.
4. *Производство отливок из сплавов цветных металлов* / А. В. Курдюмов, М. В. Пикун, В. М. Чурсин, Е. Л. Бибики. — М.: Металлургия, 1986. — 416 с.
5. *Демченко В. Ф., Грановский В. К., Тарасевич Н. И.* Исследование процесса формирования ванны жидкого металла при плазменно-дуговой гарнисажной плавке с помощью ЭВМ // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1980. — № 12. — С. 96–100.

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

Поступила 29.06.2004

Международная конференция «ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ»

Швеция, г. Стокгольм, 7–10 июня 2005 г.

Организаторы

Королевский технологический институт, Европейское общество по материалам,
Шведское общество по материалам

Тематика

- Процессы кристаллизации неметаллов и метастабильное затвердевание. Наноматериалы
- Процессы выращивания монокристаллов
- Кинетика кристаллизации и образование микроструктур, включая моделирование
- Моделирование нагрева, жидких потоков, деформаций и напряжений
- Зависимости между видами обработок, структурой и свойствами. Новейшие процессы, сварка, пайка, соединения композитов, обработка пенопластов, реолиты, измерение свойств
- Кристаллизация при непрерывном литье
- Точное литье компонентов и кристаллизация чугунов, алюминиевых сплавов и других цветных сплавов
- Исследование микрогравитации

Контактные телефоны: +46-8-790 6654; +46-8-790 7984. Факс: +46-8-21 65 57. E-mail: asp@matpr.kth.se