

ВОЗДЕЙСТВИЕ НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА РАСПЛАВЫ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Н.А. Шабурова

Работа посвящена исследованию способа воздействия на кристаллизующийся расплав, позволяющий существенно влиять на его физико-механические свойства. Исследуемый сплав Al-4% Cu предварительно подвергался облучению на стадии кристаллизации наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ). После этого исследовалось влияние НЭМИ на протекание процессов старения, предварительно закаленных и деформированных образцов. Проводилось измерение таких физических характеристик металла, как твердость, удельное электросопротивление, микроструктура. Получены данные, подтверждающие влияние предварительной импульсной обработки на свойства металла.

В настоящее время на производстве применяется большое разнообразие способов улучшения качества металла, воздействуя на него на стадии кристаллизации. Новым способом обработки кристаллизующихся расплавов является воздействие наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ).

В работе [1] приведены результаты воздействия НЭМИ на свойства жидкого металла. Изучали алюминиевые сплавы АК7, АК5М и цинковые сплавы ЦА4 и ЦА4МЗ влияние импульсного воздействия на свойства жидкого и закристаллизовавшегося металла. Исследовали следующие свойства расплава: жидкотекучесть, вязкость, поверхностное натяжение, краевой угол смачивания, а также структуру и физико-механические свойства.

В проводимых экспериментах использовался генератор НЭМИ типа GNP со следующими характеристиками. Длительность импульса 0,5 нс, амплитуда более 5 кВ, мощность в одном импульсе более 1 МВт, частота повторения импульсов до 1000 Гц. Большая мощность и малая длительность импульса приводили к возникновению импульсов электромагнитных полей с напряженностью до 10^7 В/м [1]. Воздействие НЭМИ на расплав осуществляли погружением излучателя в металл, изолировав его от контакта с жидким металлом с помощью кварцевого стекла, прозрачного для наносекундных электромагнитных волн.

Плавку проводили в шахтной печи типа СШОЛ в тигле из жаропрочной стали, покрытом огнеупорной краской на основе электрокорунда. Температуру контролировали по показаниям платино-платинородиевой термопары, встроенной в печь, и дополнительно хромель-алюмелевой термопары непосредственно в расплаве. Излучатель был выполнен в виде латунной трубки диаметром 14 мм и помещен в кварцевую пробирку диаметром 20 мм. Длина трубки 500 мм.

Металл расплавляли, перегревали АК5М до 780 °С, ЦА4 до 480 °С, облучали НЭМИ 10 мин, в течение которых температура алюминиевого сплава опускалась до 660 °С, цинкового - до 420 °С, и заливали в формы. Сплавы без облучения обрабатывали аналогично.

Исследования показали, что у алюминиевого сплава повышается жидкотекучесть, уменьшается поверхностное натяжение, краевой угол смачивания, у цинкового сплава уменьшается поверхностное натяжение, краевой угол смачивания и жидкотекучесть. Прочность на разрыв для алюминиевого сплава несколько увеличивается, для цинкового не меняется. Относительное удлинение для алюминиевого сплава возрастает незначительно, для цинкового - более чем в 3 раза.

Было отмечено, что в обработанном НЭМИ образце кремний расположен в виде равномерных компактных включений, а в необработанном - неравномерных, иглообразных. В структуре цинкового сплава уменьшается количество и размер легкоплавких эвтектических включений ($a_{zn} + a_c$) (из-за этого снижается жидкотекучесть).

Полученные данные позволили предположить, что под действием НЭМИ может измениться переохлаждение расплавов и увеличиться количество кристаллизационных зародышей, т.е. принцип действия НЭМИ близок к тому, что происходит при электромагнитном перемешивании металлов [1].

Ри Э.Х., Ри Хосен [2, 3] изучали влияние длительности облучения жидкой фазы НЭМИ на кристаллизацию, структурообразование и физико-механические свойства алюминия (гранулированный алюминий, 99,78 % Al), силумина А390 (17 % Si, 4 % Си, 0,2 % Mg), а так же меди и оловянной бронзы Бр6.

Использовался генератор НЭМИ (ГНИ-01-1-6), имеющий следующие характеристики: полярность импульсов - положительная; амплитуда импульсов на нагрузке - 50 Ом - 6000 В; длительность импульсов на половинном уровне - 0,5 нс; максимальная допустимая частота следования генерируемых импульсов - 1 кГц.

Нагрев алюминия и его сплава производили до температуры 900 °С, после пятиминутной выдержки при этой температуре обрабатывали жидкий алюминий НЭМИ в течение 5,10, 15,20 и 25 минут. Затем после отключения генератора, определялась интенсивность гамма-проникающих излучений в процессе охлаждения со скоростью 20 °С/мин до температуры 300 °С. Параллельно строилась термограмма кристаллизации.

Определялись следующие кристаллизационные параметры: температура кристаллизации для алюминия и температуры ликвидуса и солидуса для А390; температура, при которой нарушается линейная зависимость изменения интенсивности гамма-проникающих излучений от температуры после затвердевания; интенсивность гамма-проникающих излучений; степень уплотнения гетерофазного расплава при кристаллизации алюминия и А390; продолжительность кристаллизации алюминия и А3 90 и охлаждения жидкой фазы от 900 °С до температуры кристаллизации; коэффициент термического сжатия при охлаждении в указанном интервале температур.

Полученные результаты исследования влияния облучения НЭМИ на кристаллизационные параметры жидкой фазы и физико-механические свойства гранулированного алюминия показали, что параметры и свойства Al существенно изменяются: четко прослеживается экстремальная зависимость кристаллизационных параметров и физико-механических свойств от продолжительности облучения НЭМИ. Так, теплопроводность алюминия и силумина А3 90 зависит от времени облучения жидкой фазы НЭМИ, максимальные ее значения наблюдаются при продолжительности обработки 7-10 минут [2].

Все кристаллизационные параметры меди и бронзы так же изменяются от продолжительности обработки НЭМИ по экстремальной зависимости [3].

Исследования автора посвящены изучению влияния НЭМИ на свойства отливок сплава Al-4 % Си. Для проведения сравнения исследовался металл двух плавок. В первом случае расплав облучали НЭМИ в течение 15 минут при температуре 650 °С, во втором, расплав нагревался до 650 °С и выдерживался в течение 15 минут без облучения. Температурно-временные показатели изготовления отливок полностью совпадали.

Облучение расплавов проводили следующим образом. Специальным генератором создавался однополярный импульс тока. Один электрод генератора погружался в тигель с расплавом, а второй закреплялся на корпусе тигля. В проводимых экспериментах использовался генератор НЭМИ типа GNP со следующими характеристиками. Длительность импульса 0,5 нс, амплитуда более 5 кВ, мощность в одном импульсе более 1 МВт, частота повторения импульсов до 1000 Гц, напряженность до 10^7 В/м.

Во всех случаях, с облучением и без, металл разливался в земляную форму.

Из отливок облученного НЭМИ и необлученного металла были изготовлены образцы, которые затем подвергались термической обработке по следующему режиму: закалке с 505-510 °С с выдержкой 16 часов и последующему старению при температурах 100, 130, 160 и 190 °С. Помимо этого часть металла после закалки была подвергнута холодной пластической деформации на 15 %, после которой проводилось старение при 160 °С.

Далее проводилось измерение твердости по Виккерсу и электропроводности на приборе ИЭ-1М. Исследования микроструктуры проводил на оптическом микроскопе Neophot 21.

На рис. 1 приведены сравнительные кривые изменения твердости образцов в процессе старения при 100,130, 160 °С.

Столь незначительное отличие исходной твердости свидетельствует об отсутствии влияния НЭМИ на упрочнение закаленного металла.

Видно, что старение при 100 °С (см. рис. 1а) как для облученного, так и для необлученного образца не позволило достичь максимума твердости за все время старения. Однако, если для необлученного образца характерно равномерное повышение данного показателя, то для облученно-

го имеется площадка. Во всем временном интервале появления площадки, значения твердости облученного образца практически не изменяются. Образование площадки при старении обусловлено, по-видимому, либо частичным растворением зон Г.П. и началом образования частиц метастабильных фаз, либо затуханием процесса образования зон при большом инкубационном периоде появления метастабильных фаз [4].

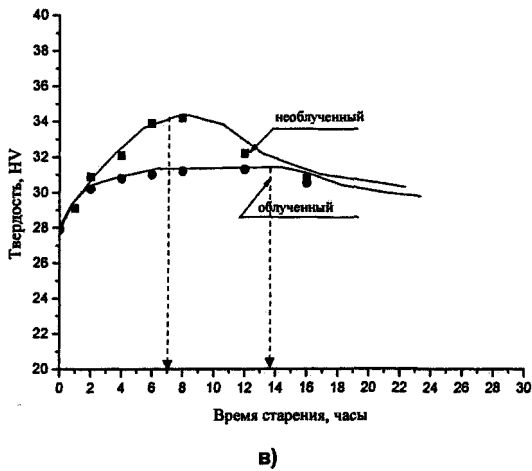
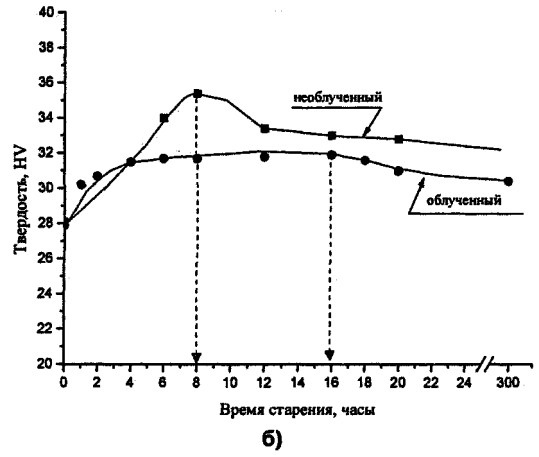
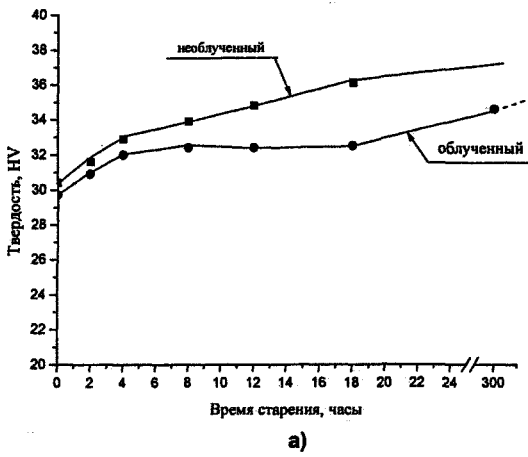


Рис. 1. Изменение твердости сплава Al-4 % Cu в процессе старения: а – при 100 °С, б – при 130 °С, в – при 160 °С

При повышении температуры старения характер зависимости твердости изменяется: на кривых появляются максимумы (см. рис. 1б, в), связанные с переходом от зонного старения к фазовому. Причем, чем выше температура старения, тем меньше эффект старения (прирост твердости относительно твердости закаленного образца) и достигается он за меньшее время. Так для необлученного образца максимум твердости 35,4 HV достигается через 8 часов выдержки при 130 °С. При 160 °С максимум твердости 34,2 HV достигается уже через 7 часов. При 130 °С наибольшая твердость облученного образца 31,9 HV достигается 16-часовой выдержкой. При 160 °С максимум твердости 31,3 HV достигается для облученного образца уже через 14 часов. При повышении температуры старения величина максимума снижается не столь значительно как для необлученного образца.

В целом, следует отметить, что облученный образец менее склонен к старению, чем необлученный. Дня наглядности, на рис. 2 представлена зависимость эффекта старения для двух сплавов от температуры старения. Под эффектом старения понимается разница твердости закаленного образца и после соответствующего режима старения.

На образцах после закалки, пластической деформации при комнатной температуре и старении при 160 °С так же замерялась твердость на

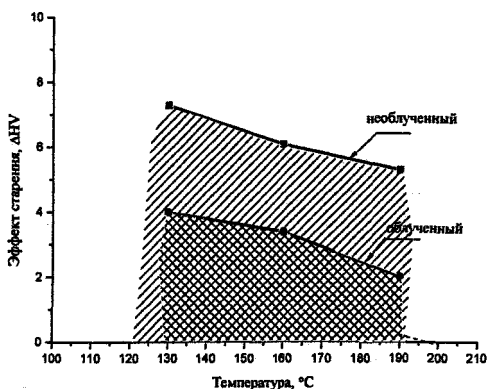


Рис. 2. Зависимость эффекта старения сплава Al-4%Cu от температуры старения

приборе Виккерса. На рис. 3а показаны графики зависимости твердости этих образцов от длительности старения при 160 °С.

Проведенное контрольное старение закаленных образцов дало практически те же результаты, что и предшествующая термическая обработка.

Максимум твердости необлученного образца составляет 34 HV и достигается она за 8 часов старения. Максимальная твердость облученного образца 32 HV достигается за 15 часов старения.

Таким образом, как и в предыдущем случае можно говорить о замедлении и снижении эффективности процессов старения после облучения расплава металла НЭМИ.

Пластическая деформация на 15 % при комнатной температуре, предшествующая старению, существенно повышает прочностные свойства как облученного, так и необлученного металла (твердость непосредственно после деформации возрастает на 13,1 и 12,9 ед. HV соответственно). Помимо начального повышения твердости, очевидно, что деформация интенсифицирует процессы старения. В результате чего максимум твердости необлученного образца 49,2-49,5 HV наблюдается через 7-8 часов старения. Наибольшая твердость облученного образца 48,6 HV отмечена через 11-12 часов старения.

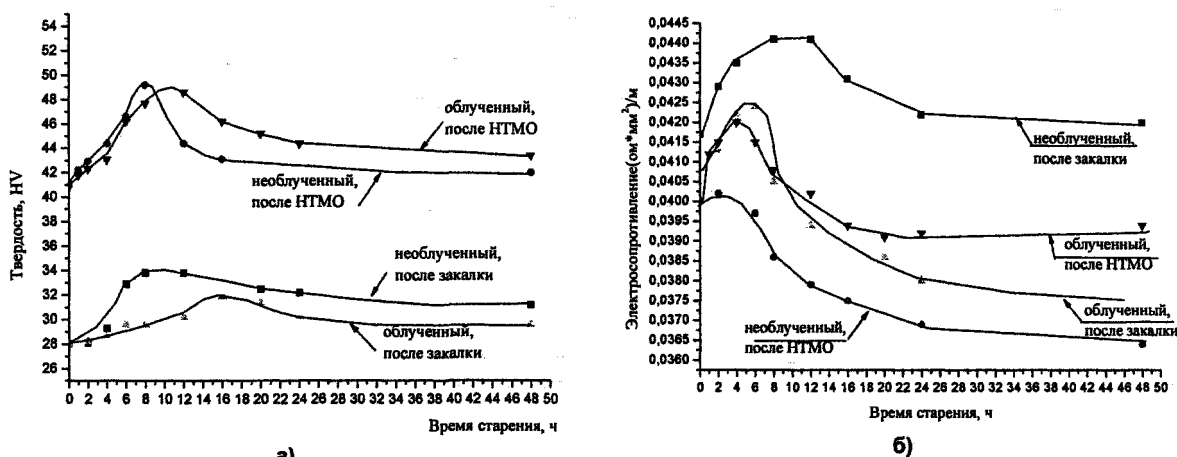


Рис. 3. Влияние длительности старения при 160 °С образцов, закаленных и подвергнутых пластической деформации на твердость (а) и электросопротивление (б)

По всей видимости, предварительная пластическая деформация оказывает гораздо большее влияние на облученные образцы. Что выражается в более существенном снижении времени старения, необходимом для достижения максимальной твердости (с 15 ч до 11-12 ч у облученного образца, с 8 ч до 7-8 ч у необлученного). Так же, если для закаленных образцов, эффекты старения отличались существенно - 5,8 и 3,9 HV соответственно для необлученного и облученного образца, то после пластической деформации они, повышаясь по абсолютному значению, имеют уже меньшее различие (8,3 и 7,5 HV соответственно для необлученного и облученного образца).

Для всех температур старения, кроме 100 °С наблюдается экстремальное изменение электросопротивления. Максимум данного показателя по временной шкале совпадает с соответствующим максимумом твердости. Что можно объяснить протекающими при старении процессами. Так на стадии образования зон Г.П. наблюдается повышение электросопротивления, при переходе к фазовому старению электросопротивление сплавов уменьшается. Отсутствие максимума данного показателя на кривых старения при 100 °С показывает, что при этой температуре протекает только зонная стадия.

Значения электросопротивления начальных гомогенизированных закаленных обработанных и необработанных НЭМИ образцов практически совпадают (0,0415 и 0,0418 Ом·м²/м соответственно). По мере увеличения времени выдержки наблюдается повышение электросопротивления, причем как для облученного, так и для необлученного наиболее интенсивное повышение наблюдается при 130 °С и 190 °С. При этих же температурах достигается и наибольший прирост данного показателя.

Для всех закаленных и деформированных образцов, состаренных при 160 °С наблюдается достаточно резкое увеличение электросопротивления в процессе старения. Следует отметить, что максимальное значение данной характеристики для деформированных образцов достигается намного быстрее, чем максимум твердости (см. рис. 3б).

Несмотря на близкие свойства закаленных облученного и необлученного металла проведенный металлографические исследования позволили обнаружить существенные различия микроstructures образцов - а именно - полное отсутствие эвтектической фазы в виде так называемых «иероглифов» в облученном образце. Фаза эвтектического состава $\alpha + \text{CuAl}_2$ выделяется в виде тонких игл по границам зерен (рис. 4). Структура же необлученного образца представлена как игольчатой фазой, так и характерной для данных сплавов иероглифообразной эвтектикой (см. рис. 4). Размеры зерен для двух сплавов близки.

В настоящее время работа продолжается. Планируется изучить влияние высокотемпературной механической обработки на свойства металла. А так же провести аналогичные эксперименты на сплаве другого состава.

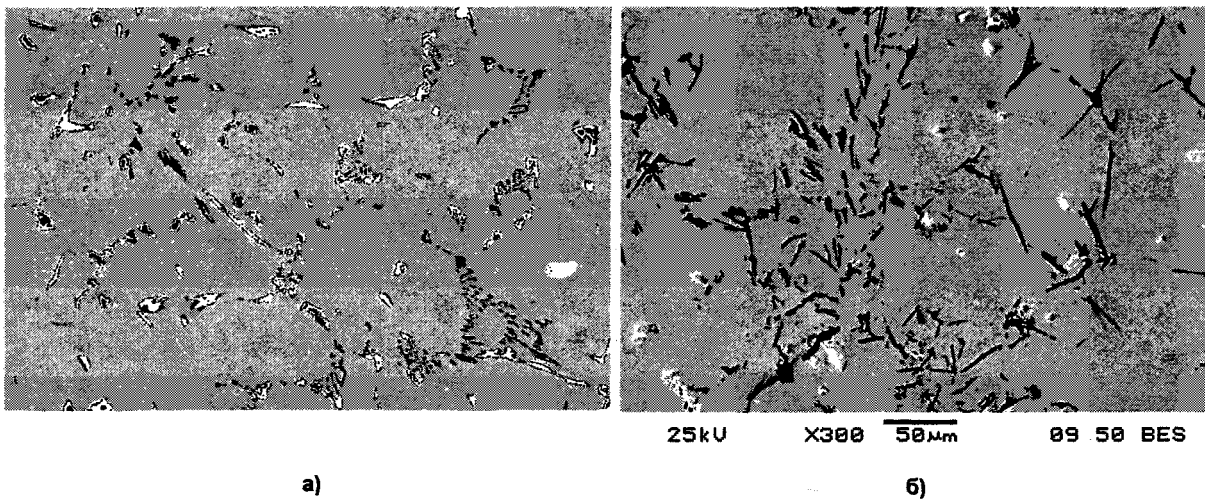


Рис. 4. Микроstructures необлученного (а) и облученного (б) образцов соответственно после закалки и длительного старения при 190 °С, X300

Таким образом, проведенные исследования наглядно свидетельствуют о наличии влияния НЭМИ на свойства сплава цветного металла. Это влияние проявляется в замедлении и снижении эффективности процессов старения, а так же изменении структуры сплава.

Литература

1. Знаменский Л.Г., Крымский В.В., Кулаков Б.А. Электроимпульсные нанотехнологии в литейных процессах: Монография. - Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2003. - 130 с.
2. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) на кристаллизацию, структурообразование и физико-механические свойства алюминия (гранулированный алюминий, 99,78% Al) и силумина АЗ 90 / Э.Х. Ри, Хосен Ри, С.В. Дорофеев и др. // Повышение эффективности инвестиционной и инновационной деятельности в Дальневосточном регионе и странах АТР. В 4 ч. 4.1: Материалы международной научно-практической конференции. - Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КиАГТУ». - 2006. - С. 101.
3. Влияние обработки меди и бронзы в жидком состоянии наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) на кристаллизацию, структурообразование и физико-механические свойства / Э.Х. Ри, Хосен Ри, С.В. Дорофеев и др. // Повышение эффективности инвестиционной и инновационной деятельности в Дальневосточном регионе и странах АТР. В 4 ч. 4.1: Материалы международной научно-практической конференции. - Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КиАГТУ». - 2006. - С 97.
4. Фридляндер И.Н. Закономерности старения алюминиевых сплав // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1980. - № 8. - С. 22-28.
5. Знаменский Л.Г., Крымский В.В., Кулаков Б.А. Электроимпульсные нанотехнологии в литейных процессах. - Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2003. - 125 с.
6. Наносекундные электромагнитные импульсы и их применение / В.С. Белкин, В.А. Бухарин, В.К. Дубровин и др. - Челябинск: Изд-во Татьяны Лурье. - 2001. — 117 с.

Поступила в редакцию 23 сентября 2006 г.