



*Complex research of influence of duration of liquid phase irradiation by electromagnetic impulses on parameters of liquid state parameters is carried out.*

Э. Х. РИ, ХОСЕН РИ, С. В. ДОРОФЕЕВ, А. С. ЖИВЕТЬЕВ, Т. С. ЖЕРНОВА,  
Г. А. КНЯЗЕВ, ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет»

УДК 539.186: 537, 621.74(07)

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ, СВОЙСТВА МЕДИ И ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ

Проводили комплексное исследование влияния продолжительности облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами (ПОИ) на параметры жидкого состояния (степень уплотнения  $\Delta I_{ж}$  и коэффициент термического сжатия  $\alpha_{ж}$  при охлаждении), кристаллизационные характеристики (температура начала и конца кристаллизации  $t_{л}$  и  $t_{с}$ , продолжительность кристаллизации  $\tau_{кр}$ , степень уплотнения гетерофазного расплава при кристаллизации  $\Delta I_{кр}$ ), физико-механические (плотность, теплопроводность, твердость, микротвердость структурных составляющих) и эксплуатационные (жаростойкость, износостойкость, коррозионностойкость) свойства меди и оловянистой бронзы (Cu + 6,0 мас.% Sn).

Генератор НЭМИ (ГНИ-01-1-6) имеет следующие характеристики:

- полярность импульсов – положительная;
- амплитуда импульсов на нагрузке 50 Ом – 6000 В;
- длительность импульсов на половинном уровне – 0,5 нс;
- максимально допустимая частота следования генерируемых импульсов – 1 кГц;
- задержка выходного импульса относительно фронта импульса запуска – 120 нс;
- максимальный ток, потребляемый генератором во всем диапазоне питающих напряжений, не более 17 А при частоте 61 кГц.

**Методика облучения расплава НЭМИ.** Воздействие НЭМИ на жидкую фазу осуществляли погружением излучателя в расплав, изолировав его от контакта с жидким металлом с помощью

кварцевого или алундового наконечника, прозрачного для наносекундных электромагнитных волн. Плавку проводили в алундовом тигле на установке «Параболоид-4» конструкции ЦНИИТМШ. В качестве излучателя использовали стальной стержень диаметром 6 мм.

**Строение жидкой фазы.** Установлено, что минимальные значения степени уплотнения расплава от температуры перегрева 1300 °С до температуры начала кристаллизации  $\Delta I_{ж-л}$  и коэффициента термического сжатия  $\alpha_{ж}$  ( $\alpha_1$ ) наблюдаются при ПОИ, равной 15 мин, т. е. расплав подвергается меньшей усадке с более медленным темпом сжатия (усадки) при охлаждении.

Строение жидкой меди изменяется по обратной зависимости, чем у оловянистой бронзы: с увеличением продолжительности облучения до 10-минутного степень уплотнения жидкой фазы  $\Delta I_{ж-кр}$  возрастает, а коэффициент термического сжатия  $\alpha_{ж}$ , наоборот, уменьшается. Следовательно, жидкая фаза подвергается большей усадке с более быстрым темпом сжатия при охлаждении.

**Кристаллизация.** Минимальные значения кристаллизационных параметров ( $t_{кр}$  для меди,  $t_{л}$  и  $t_{с}$  для бронзы) наблюдаются при ПОИ, равной 10 и 15 мин соответственно для меди и оловянистой бронзы. При этом степень уплотнения расплава при кристаллизации меди возрастает, а при кристаллизации оловянистой бронзы, наоборот, уменьшается. Коэффициент термического сжатия  $\alpha_2$  в твердом состоянии для меди уменьшается до 10-минутного облучения НЭМИ, а для бронзы, наобо-

рот, увеличивается до 15-минутного облучения расплава НЭМИ.

#### **Структурообразование оловянистой бронзы.**

В отличие от равновесного состояния в литом сплаве обнаруживается  $\delta$ -фаза ( $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ) в составе эвтектоида ( $\alpha+\delta$ ).

Для структуры исходного, необлученного НЭМИ образца характерны строго направленные крупные (толщиной около 70 мкм) главные оси дендритов  $\alpha$ -твердого раствора. Вторичные оси дендритов практически отсутствуют. Доля  $\alpha$ -твердого раствора в структуре составляет 45–50%. В структуре облученных НЭМИ сплавов в течение 5 и 10 мин имеются компактные оси дендритов. Доля  $\alpha$ -твердого раствора в структуре составляет 50–55% для обоих образцов. Первичные и вторичные оси дендритов имеют практически одинаковые размеры: толщина первичных осей дендритов около 40 мкм, средняя толщина осей вторичных дендритов около 50–60 мкм, длина вторичных осей дендритов – 170–220 мкм соответственно. На структуре сплава, облученного в течение 15 мин, заметны некоторые существенные изменения: главные оси дендритов средней толщиной 50 мкм имеют преимущественную ориентацию в одном направлении. От главных осей дендритов отходят компактные вторичные оси толщиной около 60 мкм и длиной около 180 мкм. Доля  $\alpha$ -твердого раствора составляет 60–70%. Структура сплава, облученного в течение 20 мин, характеризуется более выраженными вторичными осями дендритов со средними размерами: толщина 60 мкм и длина 210 мкм. Первичные оси толщиной порядка 30 мкм раздроблены и располагаются преимущественно в одном направлении.

Таким образом, в микроструктуре исходного образца и облученных в течение 5, 10 и 20 мин доля  $\alpha$ -твердого раствора в структуре составляет 45–50%, что соответствует диаграмме состояния Cu–Sn. Иная картина наблюдается для сплава, облученного НЭМИ в течение 15 мин у него доля  $\alpha$ -твердого раствора в структуре составляет 60–70%. Следовательно, наиболее значительные изменения микроструктуры сплава Cu+6%Sn наблюдаются при 15-минутном облучении расплава НЭМИ.

На сканирующем электронном микроскопе EVO-50XP (фирма «Карл Цейс») исследовали микроструктуру образцов из бронзы, подвергнутых облучению НЭМИ в жидком состоянии в течение 5, 10, 15 и 20 мин, при увеличениях от 30 до 5000 (для особых участков шлифа). Исследованию подвергали участки образцов, находящихся на различных расстояниях от поверхности слитка (край, середина и центр).

Микроструктура исходной бронзы состоит из неоднородного  $\alpha$ -твердого раствора, имеющего дендритное строение, и эвтектоида ( $\alpha+\delta$ ). При увеличении 1000 эвтектоид имеет скелетообразное строение. Микроструктура характеризуется неоднородностью, зависящей от расстояния от поверхности слитка. Следует также отметить, что в литом сплаве формируется значительное количество усадочных пор, особенно в центральной зоне слитка, где кристаллизация идет более медленным темпом.

Облучение расплава НЭМИ в течение 5 мин существенно изменяет процесс структурообразования. Наблюдается тенденция измельчения структурных составляющих ( $\alpha$  и эвтектоид) сплава. Уменьшаются фазовая неоднородность, количество эвтектоида и его размеры независимо от местоположения исследуемых зон. Кроме того, в структуре также резко уменьшается количество усадочных пор. С увеличением ПОН до 10 мин включения эвтектоида становятся более компактными в результате их дробления (диспергирования) под воздействием НЭМИ. Дальнейшее облучение расплава НЭМИ (15 мин) способствует более интенсивному измельчению структурных составляющих. Скелетообразное строение эвтектоида превращается в более компактную форму, что видно при больших увеличениях (1500 и 4000). Крупные одиночные включения эвтектоида имеют сотовое строение независимо от места нахождения зон. При 20-минутной продолжительности облучения расплава НЭМИ эвтектоид кристаллизуется в виде цепочек. Таким образом, при длительном облучении расплава вновь проявляется фазовая неоднородность и увеличиваются размеры эвтектоида.

**Микрорентгеноспектральный анализ.** Анализу подвергали центр (ЦД) и край (КД) дендрита  $\alpha$ -твердого раствора, включения эвтектоида ( $\alpha + \delta - \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ), среднее содержание Cu и Sn в  $\alpha$ -твердом растворе эвтектоида ( $\alpha + \delta - \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ).

По характеру распределения Cu и Sn в отраженных электронах и рентгеновских излучениях Cu Ka-L и Sn La-L в различных участках необлученного НЭМИ сплава (карты) видно, что медь и олово распределяются в металлической основе  $\alpha$ -твердого раствора неравномерно в зависимости от места анализа (профили). Компоненты сплава сравнительно равномерно распределяются в металлической основе по выбранным профилям. Однако по профилям содержания Cu и Sn существенно отличаются. В местах скопления эвтектоида ( $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ) содержание меди резко уменьшается, а содержание олова резко возрастает.

На рис. 1, а, б приведено распределение Cu и Sn по сечению дендрита  $\alpha$ -твердого раствора. В цен-

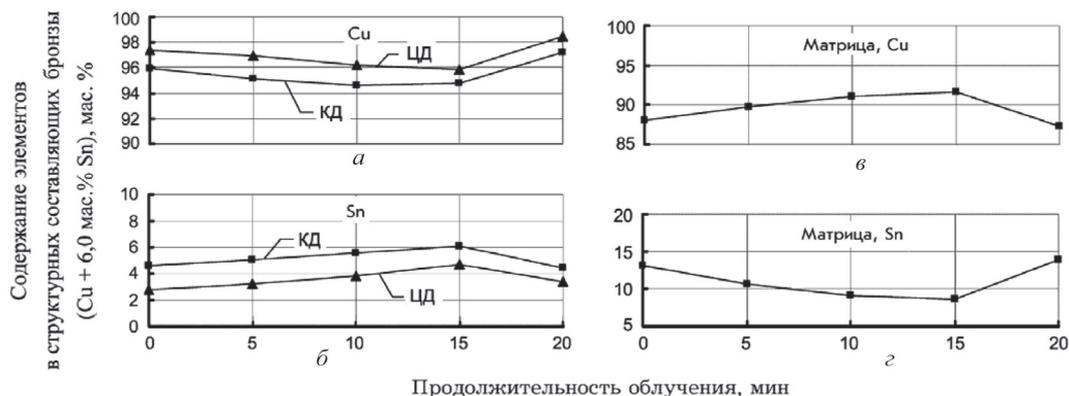


Рис. 1. Распределение элементов в различных фазах бронзы в зависимости от продолжительности облучения жидкой фазы НЭМИ

тре дендрита (ЦД) медь растворяется больше, чем в его периферии (КД). Следовательно, в твердом растворе наблюдается прямая ликвация меди и обратная ликвация олова. Облучение НЭМИ жидкой фазы в течение 5–15 мин приводит к более равномерной фазовой однородности по сравнению с необлученной бронзой, о чем свидетельствуют результаты рентгеновских излучений. Наблюдается тенденция снижения растворимости меди в центре и крае дендрита твердого раствора (рис. 1, а), а характер распределения олова имеет обратную зависимость, чем медь (рис. 1, б). Такой характер растворимости олова в твердом растворе можно объяснить измельчением электронного соединения  $Cu_3Sn_8$  и уменьшением его количества под воздействием НЭМИ в составе эвтектоида, в конечном итоге, частичным растворением электронного соединения в  $\alpha$ -твердом растворе.

Содержание меди в  $\alpha$ -твердом растворе эвтектоида ( $\alpha + Cu_3Sn_8$ ) возрастает (до ~92–93 мас.%) до 15-минутного облучения жидкой фазы НЭМИ (рис. 1, в), а содержание олова, наоборот, уменьшается до ~7,5 мас.% (рис. 1, г). Следовательно, можно сделать вывод о том, что при облучении жидкой фазы возрастающей продолжительностью (до 20 мин) намечается тенденция увеличения растворимости олова в первичных дендритах  $\alpha$ -твердого раствора и уменьшения ее в металлической основе эвтектоида (без первичного  $\alpha$ -твердого раствора и  $\delta$ -фазы). Последнее обстоятельство должно смещать состав оловянистой бронзы в сторону меньшей перитектичности и эвтектоидности. Это в свою очередь, по-видимому, должно способствовать кристаллизации мелкодисперсной электронной фазы типа  $Cu_3Sn_8$  в составе эвтектоида при 15-минутном облучении расплава НЭМИ. При этом микронеоднородность распределения олова в металлической основе бронзы существенно уменьшается, что хорошо видно на рентгеновских излучениях Cu Ka-L

и Sn La-L. При ПОН, равной 20 мин, растворимость олова в первичных дендритах  $\alpha$ -твердого раствора уменьшается, а в металлической матрице эвтектоида, наоборот, возрастает (рис. 1, б–г), что приводит к кристаллизации большего количества эвтектоида более крупного размера. При этом вновь проявляются микронеоднородности по распределению олова в металлической основе, о чем свидетельствуют результаты рентгеновских излучений.

**Физико-механические свойства.** Исследовали влияние ПОН жидкой фазы на электро- и теплопроводность, плотность, твердость, параметр кристаллической решетки меди. На рис. 2 приведены результаты этих исследований.

Минимальная твердость и максимальная теплопроводность облученной меди наблюдаются также при 10-минутной обработке НЭМИ жидкой фазы; теплопроводность возрастает в 1,5 раза, а твердость уменьшается на 2,7 ед. по НВ; коэффициент электросопротивления изменяется по зависимости, обратной теплопроводности.

Максимальная плотность меди при 20 °С наблюдается при 10-минутной обработке жидкой фазы; при этом период кристаллической решетки  $a$  (рис. 2) меди приобретет минимальное значение.

На рис. 3 приведены зависимости теплопроводности, твердости и плотности бронзы от ПОН расплава. Получены следующие результаты: теплопроводность бронзы, облученной НЭМИ в жидком состоянии в течение 15 мин, возрастает в 2,0 раза, а твердость – в 1,24 раза; максимальная плотность также наблюдается при 15-минутной обработке жидкой бронзы.

**Эксплуатационные свойства меди и бронзы.** Удельный прирост массы образца из меди в зависимости от ПОН изменяется по экстремальной зависимости и имеет минимальное значение (максимальная жаростойкость) при 10-минутной обра-

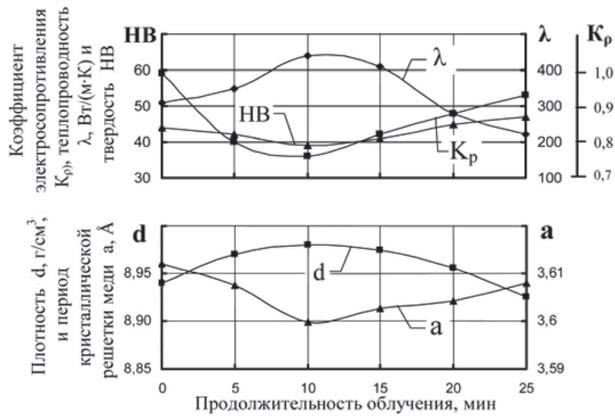


Рис. 2. Влияние продолжительности облучения жидкой фазы НЭМИ на физико-механические свойства меди

ботке НЭМИ жидкой фазы; значение коэффициента коррозии до 5–10 мин обработки НЭМИ резко снижается (примерно в 2 раза), а затем незначительно возрастает. При облучении жидкой фазы в течение 10 мин наблюдаются максимальные значения жаростойкости (в 1,25 раза) и коррозионной стойкости (в 2,0 раза).

Установлено, что удельный прирост массы образцов из бронзы до 10 мин облучения возрастает,

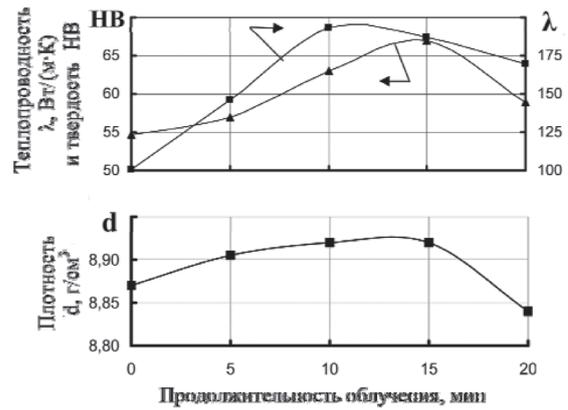


Рис. 3. Влияние продолжительности облучения жидкой фазы НЭМИ на физико-механические свойства бронзы (6,0% Sn)

а затем, при 15 мин облучения, резко снижается в 2 раза; при 20 мин снова возрастает; коэффициент коррозии  $K$  до 5–15 мин облучения резко увеличивается, а при дальнейшем увеличении ПОН незначительно уменьшается.

Таким образом, облучение НЭМИ жидкой фазы меди и оловянистой бронзы в течение 10–15 мин существенно изменяет их физико-механические и эксплуатационные свойства.