



Ри Хосен, Евстигнеев А. И., Ри Э. Х., Дорофеев С. В., Якимов В. И.
Hosen Ree, A.I. Yevstigneev, E.H. Ree, S.V. Dorofeev, V.I. Yakimov

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ
ГЕНЕРАТОРА НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ, СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
И СВОЙСТВА СИЛУМИНА (АК7ч)**

**THE INFLUENCE OF VOLTAGE PULSE AMPLITUDE OF A NEMI GENERATOR
UPON THE PROCESSES OF CRISTALLIZATION, STRUCTURE FORMATION
AND ON THE PROPERTIES OF SILUMINE**

Ри Хосен – доктор технических наук, профессор Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Mr.Hosen Ri – Doctor of Engineering, Professor, Head of Department, the Pacific State University, city of Khabarovsk, 680035, 136 Tikhookeanskaya str.

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: nis@knastu.ru.

Mr.Alexey I. Yevstigneev – Doctor of Engineering, Professor, Provost for Research, Kovsomolsk-on-Amur State Technical University, 27, Lenina prospect, 681013 Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk region, Russian Federation, nis@knastu.ru

Ри Эрнест Хосенович – доктор технических наук, профессор Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Mr.Ernest H.Ri – Doctor of Engineering, Professor, the Pacific State University, city of Khabarovsk, 680035, 136 Tikhookeanskaya str.

Дорофеев Станислав Вячеславович – кандидат технических наук, доцент Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Mr.Stanislav V. Dorofeev – PhD in Engineering, Associate Professor, the Pacific State University, city of Khabarovsk, 680035, 136 Tikhookeanskaya str.

Якимов Виктор Иванович – кандидат технических наук, ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681018, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1; (4217) 25-63-64.

Mr.Victor I. Yakimov – PhD in Engineering, JSC Yury Gagarin Aviation Plant, 681018 Komsomolsk-on-Amur, 1 Sovetskaya str., Phone: + 7 (4217) 25-63-64

Аннотация. Представлены результаты исследований обработки алюминиевого сплава АК7ч различной (регулируемой) амплитудой импульсов напряжения до 15 кВ (5, 10 и 15 кВ) генератора НЭМИ. Показано влияние амплитуды импульсов напряжения (АИН) на температуру начала кристаллизации, время кристаллизации, степень уплотнения расплава, коэффициенты термического сжатия, теплопроводность, структурные составляющие, микротвердость.

Summary. The paper presents the results of a study in which an aluminum alloy AK7ch was treated by volt pulses of different (controlled) amplitude up to 15 kWt (5, 10 and 15 kWt) produced by the NEMI generator. We demonstrate that volt pulse amplitude can impact the chill point, crystallization time, packing degree of the melt, thermal compression coefficient, thermal conductivity, constituents, microhardness.

Ключевые слова: импульс, кристаллизация, микротвердость, теплотвердость, сплав, структура.

Keywords: pulse, crystallization, microhardness, heat conduction, alloy, structure.

УДК 621.74:669.35.6

Эксплуатационные характеристики литых из цветных металлов определяются физико-механическими свойствами сплава, которые формируются в предкристаллизационный и кристаллизационный периоды. Известно влияние на данные параметры термовременной и термоскоростной обработки, модифицирования, различных физических полей [1; 2; 3]. С этих позиций были проведены работы по управлению процессом формирования отливок с определенным комплексом свойств воздействием на расплав несинусоидальными электромагнитными импульсами [4; 5], в которых приведены результаты исследований влияния продолжительности облучения жидкой фазы НЭМИ на строение, кристаллизацию и структурообразование, физико-механические (плотность, электро- и теплопроводность, твердость, микротвердость структурных составляющих и др.) и эксплуатационные (жаростойкость, коррозионностойкость, износостойкость) свойства разных сплавов. При проведении данной работы использовался генератор НЭМИ ГИН-01-1-6, имеющий постоянную амплитуду импульсов напряжению 6 кВ.

В данной работе был использован генератор наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) марки ГИН-15-1 с регулируемыми амплитудами импульсов (от 5 до 15 кВ).

В качестве объектов исследования были использованы электролитическая медь в качестве модельного металла и силумин АК7С. Методика исследований заключалась в следующем.

Медь перегревали до 1300 °С, и силумин АК7С – до 780 °С, после 5-минутной выдержки обрабатывали (облучали) жидкую фазу с различной амплитудой импульсов напряжения при постоянной частоте в течение 5, 10 и 15 мин.

Параллельно исследовалось влияние термовременной обработки необлученного силумина АК7С. Затем охлаждали жидкую фазу со скоростью 20 °С/мин до температуры 500 °С. В процессе охлаждения измерялась интенсивность γ – проникающих излучений и строилась параллельно термограмма кристаллизации.

Из рис. 1, *a – в* следует, что независимо от величины амплитуды импульсов напряжения генератора НЭМИ наблюдается следующая закономерность изменения кристаллизационных параметров меди от продолжительности облучения жидкой фазы НЭМИ (ПОН):

1. С повышением ПОН намечается тенденция снижения температуры начала $t_{кр}$ и времени $\tau_{кр}$ кристаллизации меди до определенной ПОН (до 10 мин). При длительном облучении НЭМИ (15 мин) с большой амплитудой импульсов напряжения (10 и 15 кВ) температура и время кристаллизации меди увеличиваются (см. рис. 1, *a – в*).

2. Степень уплотнения жидкой меди от 1300 °С до температуры начала кристаллизации $t_{кр}$ ($-\Delta J_{ж}$) возрастает до 5-10-минутного облучения НЭМИ с последующим резким снижением ее до 15 мин, причем увеличение амплитуды способствует уменьшению значений $-\Delta J_{ж}$ (см. рис. 1, *г – е*). Степень уплотнения меди при кристаллизации $-\Delta J_{кр}$ также изменяется по аналогичной зависимости от ПОН.

3. Коэффициент термического сжатия $\alpha_{ж}$ жидкой меди изменяется от ПОН также по экстремальной зависимости от ПОН с максимумом его значения при 10-минутном облучении НЭМИ и амплитудах импульсов 5 и 10 кВ. При амплитуде импульсов 15 кВ значения $\alpha_{ж}$ постепенно уменьшаются от ПОН (см. рис. 1, *ж – и*). Коэффициент термического сжатия твердой меди ($\alpha_{тв}$) при амплитуде 5 кВ постоянно возрастает до 15-минутного облучения, а при амплитуде 10 кВ изменяется по экстремальной зависимости от ПОН и по абсолютной величине данный коэффициент значительно меньше, чем при амплитудах импульсов 5 и 10 кВ.

4. Теплопроводность меди зависит от ПОН и амплитуды импульсов напряжения генератора НЭМИ (см. рис. 2, *a – в*):

- независимо от величины амплитуды импульсов напряжения генератора НЭМИ максимумы теплопроводности меди наблюдаются при ПОН, равной 10 мин (см. рис. 2, *a*);

- с увеличением амплитуды импульсов теплопроводность меди резко возрастает до 6 кВ с последующим ее снижением по мере увеличения амплитуды импульсов напряжения генератора до 15 кВ;

- при амплитудах импульсов 5-6 кВ теплопроводность меди возрастает в 1,73 раза при 5-6 кВ; 1,42 раза при 10-15 кВ.

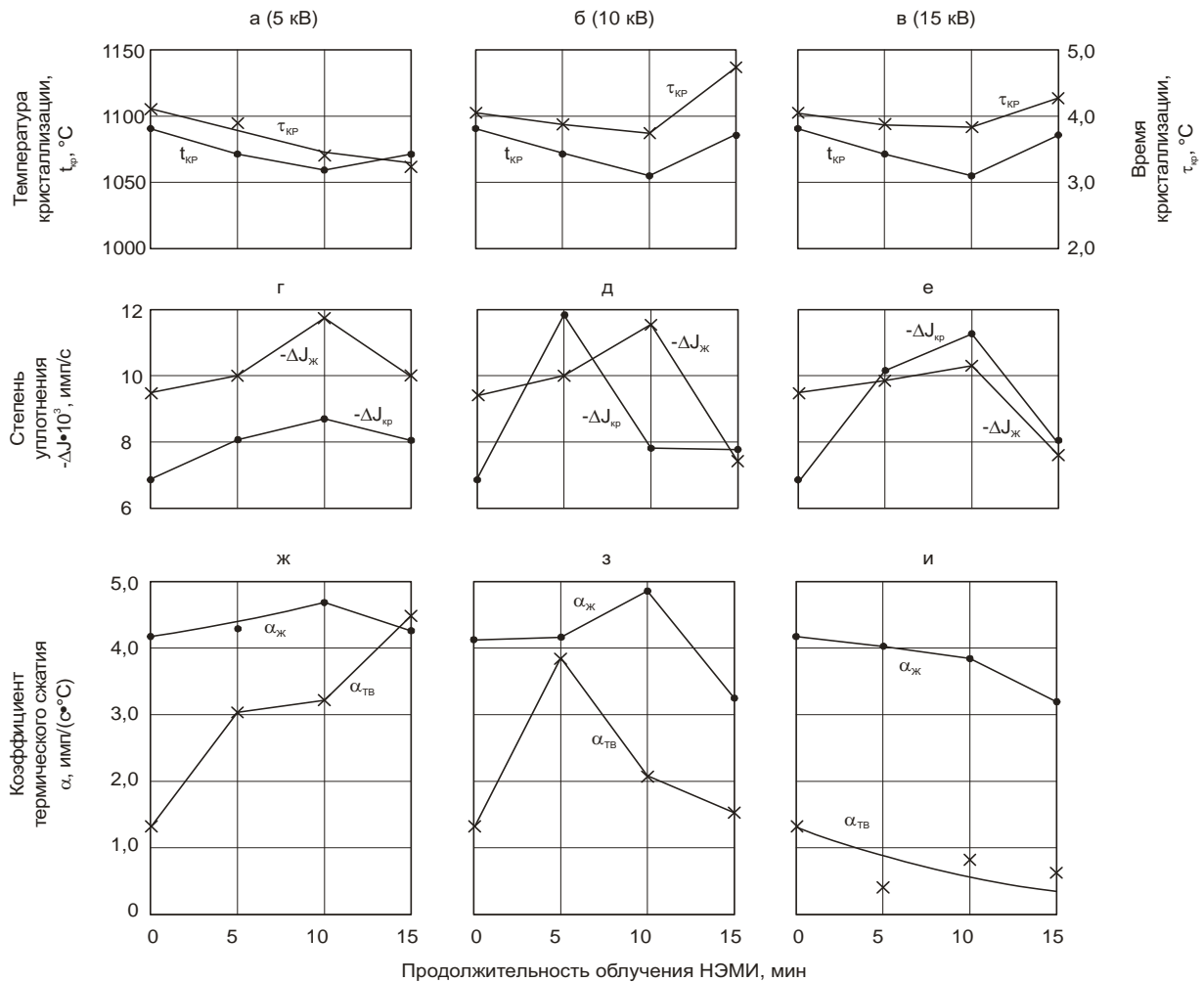


Рис. 1. Влияние амплитуды напряжения генератора НЭМИ на кристаллизационные параметры меди

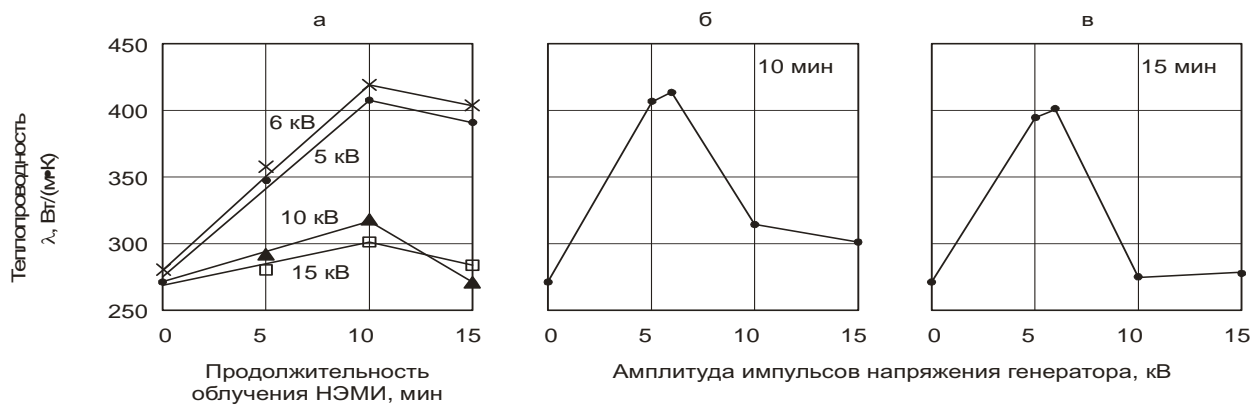


Рис. 2. Влияние амплитуды импульсов напряжения генератора НЭМИ и продолжительности облучения на теплопроводность меди

Таким образом, оптимальными амплитудами импульсов напряжения генератора НЭМИ при выбранном объеме металла и ПОН является соответственно 5-6 кВ и 10-минутное облучение жидкой меди НЭМИ. При этом теплопроводность меди возрастает в 1,73 раза в сравнении с необлученной медью в жидком состоянии.

При исследовании влияния амплитуды импульсов напряжения генератора НЭМИ на кристаллизационные параметры и структурообразование силумина, прежде всего, необходимо уточнить влияние термовременной обработки расплава на вышеуказанные параметры.

Из рис. 3, *а* следует, что увеличение продолжительности термовременной обработки (выдержки) при температуре 780 °С в течение до 20 мин практически не влияет на кристаллизационные параметры, хотя наблюдается некоторое измельчение его структурных составляющих – α -твердого раствора и эвтектики. При этом теплопроводность силумина также не зависит от термовременной обработки (см. рис. 3, *а*).

Статистический анализ ширины эвтектических зерен показал (см. рис. 4, *а*), что по мере увеличения времени изотермической выдержки наблюдается существенное увеличение размера эвтектических зерен в различных сечениях отливки: в центре, крае и середине.

Микротвердость H_{20} α -твердого раствора изменяется от времени выдержки по экстремальной зависимости с максимумом ее значения при 10-минутной выдержке (см. рис. 4, *б*). Микротвердость эвтектики ($\alpha + Si$) также изменяется по аналогичной зависимости (см. рис. 4, *в*).

Результаты влияния амплитуды импульсов напряжения генератора на кристаллизационные параметры силумина АК7Ч приведены на рис. 3, *е – к*. Как видно, увеличение амплитуды способствует резкому повышению температур начала кристаллизации α -твердого раствора t_{α} и эвтектики t_e (см. рис. 3, *е*). Время кристаллизации α -твердого раствора τ_{α} и эвтектики τ_e уменьшается (см. рис. 3, *ж*).

В соответствии с сокращением температурного интервала кристаллизации степени уплотнения расплава при кристаллизации α -твердого раствора $-\Delta J_{\alpha}$ и эвтектики $-\Delta J_e$ уменьшаются (см. рис. 3, *з*), следовательно, сплав становится более доэвтектическим.

Коэффициенты термического сжатия $\alpha_{ж}$ жидкого сплава от температуры 780 °С до температуры начала кристаллизации α -твердого раствора и твердого силумина $\alpha_{ТВ}$ возрастают по мере повышения величины амплитуды импульсов до 15 кВ (см. рис. 3, *и*).

Повышение температуры начала кристаллизации α -твердого раствора, по-видимому, связано с диспергированием неметаллических включений, например оксида алюминия, под воздействием НЭМИ с большей амплитудой, которые являются потенциальными зародышами центров кристаллизации α -твердого раствора. По аналогичному механизму кристаллизуется эвтектика. При этом также диспергируются кремнистые включения, входящие в состав эвтектики. По этой причине также повышается температура начала кристаллизации эвтектики.

Максимальная теплопроводность силумина наблюдается при амплитудах импульсов 5-6 кВ (см. рис. 3, *к*), и она возрастает в 1,53 раза в сравнении с необлученным силумином.

На рис. 5, *а* и *б* приведены результаты измерения микротвердости структурных составляющих силумина от амплитуды импульсов. Обработка расплава НЭМИ с различной амплитудой импульсов повышает микротвердость α -твердого раствора и эвтектики. Микротвердость α -твердого раствора возрастает в 1,25 раза, а микротвердость эвтектики – в 1,33 раза.

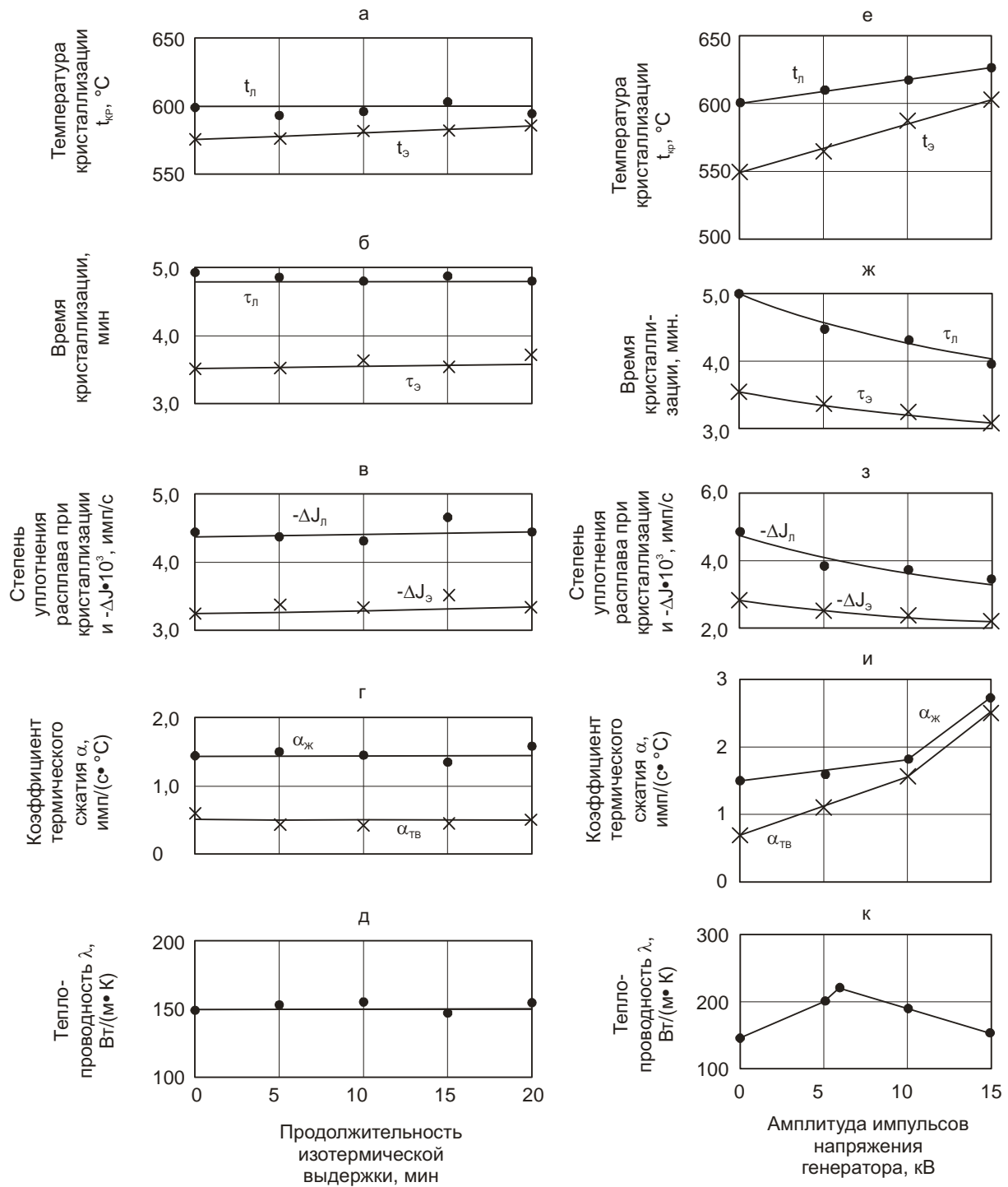


Рис. 3. Влияние термовременной обработки (а – д) и облучения расплава НЭМИ (е – к) на кристаллизационные параметры и теплопроводность силумина АК7ч

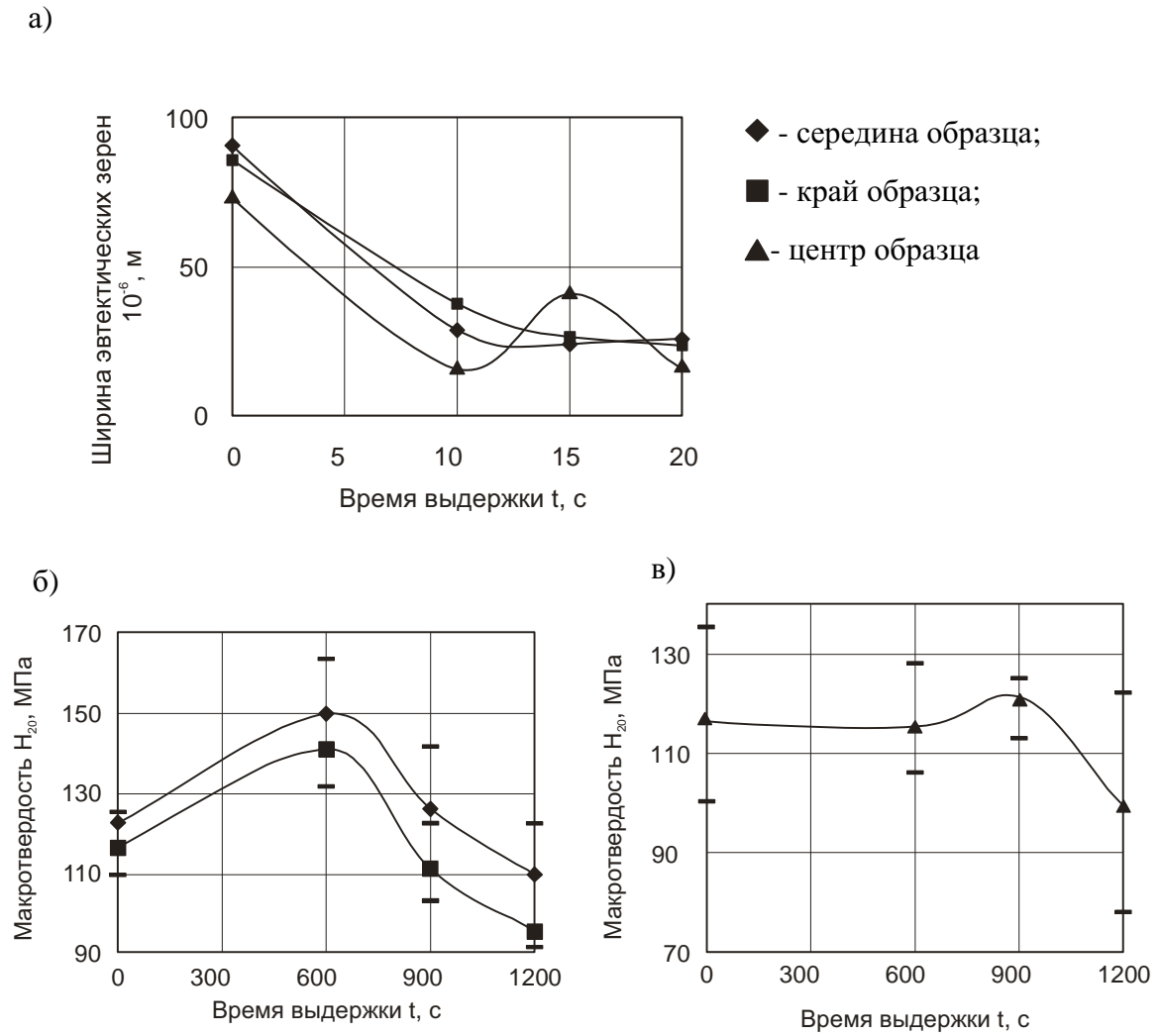


Рис. 4. Влияние термовременной обработки расплава на размер эвтектических зерен (а), микротвердость α -твердого раствора (б) и эвтектики (в)

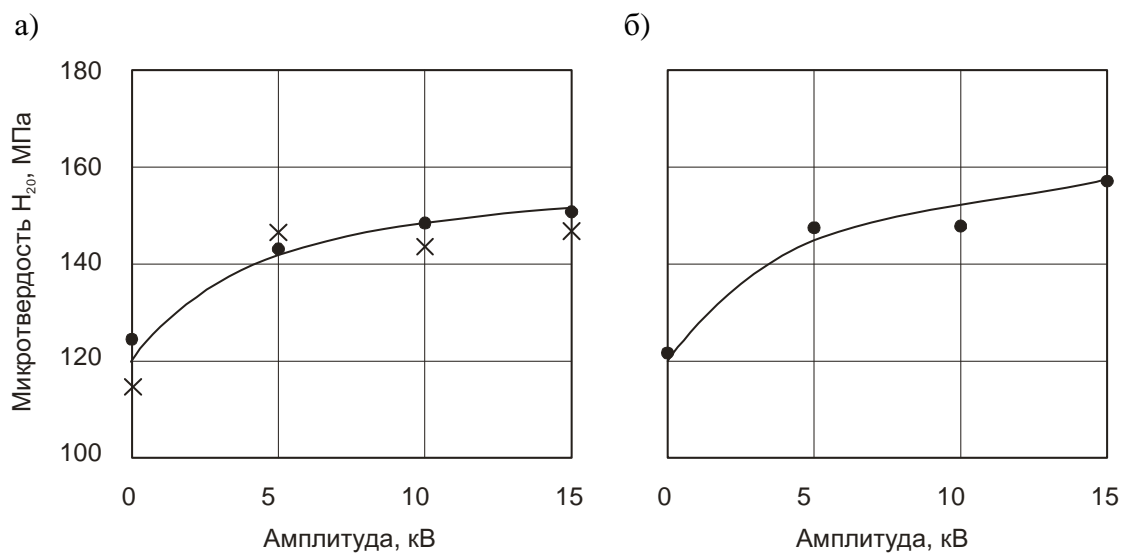


Рис. 5. Влияние продолжительности облучения расплава НЭМИ на микротвердость силумина: а – α -твердый раствор; б – эвтектика



На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На процесс кристаллизации меди влияет не только ПОН, но и величина амплитуды импульсов напряжения НЭМИ. Максимальная теплопроводность меди достигается (для исследуемого объема слитка) при малых амплитудах импульсов (5-6 кВ) и ПОН, равный 10 мин.

2. Термовременная обработка (780 °С в течение 20 мин) не оказывает существенного влияния на кристаллизационные параметры и теплопроводность силумина АК7ч, хотя наблюдается некоторое изменение его структурных составляющих.

3. Увеличение амплитуды напряжения генератора НЭМИ повышает температуру начала кристаллизации α -твердого раствора $t_{\text{л}}$ и эвтектики $t_{\text{э}}$ и сокращает время их кристаллизации $\tau_{\text{л}}$ и $\tau_{\text{э}}$.

4. В соответствии с уменьшением температурного интервала кристаллизации снижается степень уплотнения расплава при кристаллизации α -твердого раствора $-\Delta J_{\text{л}}$ и эвтектики $-\Delta J_{\text{э}}$. Следовательно, сплав под воздействием возрастающей амплитуды напряжения генератора становится более доэвтектическим.

5. Коэффициенты термического сжатия $\alpha_{\text{ж}}$ и $\alpha_{\text{тв}}$ постепенно возрастают по мере возрастания амплитуды.

6. Максимальная теплопроводность достигается при малых амплитудах 5-6 кВ и возрастает в 1,5 раза.

7. Увеличение амплитуды напряжения генератора НЭМИ способствует некоторому изменению структурных составляющих.

8. Увеличение амплитуды повышает микротвердость структурных составляющих силумина АК7ч.

Высокая амплитуда напряжения генератора НЭМИ необходима для обработки большого объема жидкого силумина. Эти исследования будут продолжены в производственных условиях на предприятии ОАО «КнаАПО».

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ри, Хосен. Свойства алюминиевых сплавов (силуминив) в жидком и твердом состоянии / Хосен Ри, Е. М. Баранов, В. И. Шпорт, В. И. Якимов и др. – Владивосток : Дальнаука. 2002. – 144 с.
- 2 Муравьев, В. И. Изготовление литых заготовок в авиастроении / В. И. Муравьев, В. И. Якимов, Хосен Ри и др. – Владивосток : Дальнаука, 2003. – С. 43.
- 3 Якимов, В. И. Исследование влияния электрического тока на процесс кристаллизации алюминиевых сплавов / В. И. Якимов, А. И. Евстигнеев, Г. Е. Паниван и др. // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела. Вып. 3. Ч. 2 : сб. научных трудов ИМиМ ДВО РАН. – Комсомольск-на-Амуре : ИМиМ ДВО РАН, 2009. – С. 274-277.
- 4 Ри, Э. Х. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации и структурообразования и свойства литейных сплавов / Э. Х. Ри, Хосен Ри, С. В. Дорофеев, В. И. Якимов. – Владивосток : Дальнаука, 2008. – 177 с.
- 5 Ри, Э. Х. Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) на свойства магниевого сплава / Э. Х. Ри, С. В., С. В. Дорофеев, Хосен Ри, В. И. Якимов. Вып. 3. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре : ИМиМ ДВО РАН, 2009. – С. 304-311.