

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.74

Э. Х. Ри, С. В. Дорофеев, В. Г. Комков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОБЛУЧЕНИЯ РАСПЛАВА НАНОСЕКУНДНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ (НЭМИ) НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И ЭЛЕМЕНТНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ОЛОВЯННИСТОЙ БРОНЗЫ

В работах [1–3] установлено, что под воздействием на расплавы НЭМИ происходит anomальное изменение кристаллизационных параметров, физико-механических и эксплуатационных свойств меди и оловянистой бронзы (Cu+6 мас. % Sn).

В настоящей работе приведены результаты электронно-микроскопического исследования и микрорентгеноспектрального анализа образцов из бронзы, не- и облученных в жидком состоянии НЭМИ.

На сканирующем электронном микроскопе EVO–50XP (фирма «Карл Цейс») исследовалась микроструктура образцов из бронзы (6,0 масс. % Sn), подвергнутых облучению в жидком состоянии (1250°C) НЭМИ в течение 0, 5, 10, 15, 20 мин.

Шлифы были приготовлены механической резкой днища слитка на 5 мм с последующими шлифовкой и полировкой. В качестве травителя использовался раствор хлорного железа (11 гр FeCl₃ на 100 мл H₂O). Приготовленные шлифы просматривались на СКАНе при увеличениях от 30 до 5000 крат (для особых участков шлифа). Исследованию подвергались участки 1, 2 и 3, удаленные от поверхности слитка на различных расстояниях. Выявлены следующие особенности в структурообразовании исходного, необлученного НЭМИ в жидком состоянии сплава. Микроструктура бронзы состоит из неоднородного α-твердого раствора, имеющего дендритное строение, и эвтектоида (α + δ – Cu₃₁Sn₈), располагающегося внутри участков твердого раствора α, богатого оловом. При увеличении ×1000 эвтектоид имеет скелетообразное строение (рис. 1, а). Кроме того, в структуре наблюдается темное включение компактной формы, представляющее усадочные поры. В зоне 3 (в центре слитка) усадочные поры значительно больше по количеству и размеру. В зоне 1 вблизи края слитка количество усадочных пор резко уменьшается из-за ускоренного охлаждения сплава. Однако вокруг этих пор формируется особая структура,

представляющая конгломерат кристаллов с четкими границами. Природа этих кристаллов пока не установлена. Таким образом, микроструктура бронзы, необлученной в жидком состоянии НЭМИ, характеризуется фазовой неоднородностью, зависящей от расстояния от поверхности слитка. Также следует отметить, что в литом сплаве формируется значительное количество усадочных пор, в особенности в центральной зоне слитка, где кристаллизация идет более медленным темпом.

Облучение расплава НЭМИ в течение 5 мин существенно изменяет процесс структурообразования (рис. 1, б и в). Наблюдается тенденция измельчения структурных составляющих (α и эвтектоид) сплава. Уменьшаются фазовая неоднородность, количество эвтектоида и его размеры независимо от местоположения исследуемых зон. Кроме того, в структуре также резко сокращается количество усадочных пор.

С увеличением продолжительности облучения расплава НЭМИ до 10 мин включения эвтектоида становятся более компактными в результате их дробления (диспергирования) под воздействием НЭМИ (рис. 1, в и ж).

Дальнейшее облучение расплава НЭМИ (15 мин) способствует более интенсивному измельчению структурных составляющих (рис. 1, г и з). 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. Такое строение эвтектоида также наблюдалось в зоне 1 сплавов, облученных в жидком состоянии НЭМИ в течение 5–10 мин (см. рис. 1, е и ж).

При 20-минутной продолжительности облучения расплава НЭМИ эвтектоид кристаллизуется в виде цепочек (рис. 1, д и и). Особенно это хорошо видно в зоне 3 и 2 при увеличении ×250

(см. **рис. 1, и**). Микроструктура эвтектоида имеет сложное строение ($\times 250$, $\times 1000$, $\times 2500$, см. **рис. 1, д, и и к**). В зоне 1 эвтектоид имеет сотовое строение. Таким образом, при длительном облучении расплава вновь проявляется фазовая неоднородность и увеличиваются размеры эвтектоида.

На основании проведенных электронно-микроскопических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Обработка бронзы в жидком состоянии НЭМИ устраняет усадочную пористость при продолжительности облучения расплава более 5 мин.
2. С увеличением продолжительности облучения расплава НЭМИ намечается тенденция измельчения эвтектоида и уменьшения количества эвтектоидной составляющей сплава. Уменьшается фазовая неоднородность по сравнению с необлученным расплавом.
3. При облучении расплава НЭМИ в течение 15 мин наблюдаются более интенсивное измельчение структурных составляющих и превращение скелетообразного строения эвтектоида в более компактную форму. Крупные одиночные включения эвтектоида имеют сотовое строение независимо от места нахождения исследуемых зон.

При 20-минутном облучении расплава НЭМИ эвтектоид кристаллизуется в виде цепочек (в зонах 2 и 3), где сплав затвердевает в последнюю очередь. В зоне 1, где затвердевание идет более интенсивно, эвтектоид приобретает сотовое строение. Таким образом, при длительном облучении расплава (20 мин) вновь проявляется фазовая неоднородность и увеличиваются размеры эвтектоида.

Микрорентгеноспектральный анализ образцов из бронзы производился на установке фирмы «Джеол-8100» (Япония). Анализу подвергались следующие участки:

- центр (ЦД) и край (КД) дендрита α -твердого раствора;
- включения эвтектоида ($\alpha + \delta - \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$): темные и светлые включения;
- металлическая основа между дендритами α -твердого раствора.

Исследован характер распределения меди и олова в отраженных электронах и в рентгеновских излучениях Cu KaL и Sn LaL в различных участках сплава.

Установлено неравномерное распределение компонентов бронзы в фазовых составляющих сплава по различным участкам образца (профилям). Компоненты сплава сравнительно равномерно распределяются в металлической основе по выбранным профилям. Однако по профилям содержание Cu и Sn существенно отличается.

В местах скопления эвтектоида ($\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$) содержание меди резко уменьшается, а содержание олова возрастает.

На **рис. 2** приведено распределение Cu и Sn по сечению дендрита α -твердого раствора. В центре дендрита (ЦД) медь растворяется больше, чем в его периферии (КД). Следовательно, в твердом растворе наблюдается прямая ликвация меди и обратная ликвация олова (**рис. 2, а, б**).

В темных включениях (ТВ) содержание меди несколько выше, чем в светлых (сотových), а концентрация олова, наоборот, значительно меньше (**рис. 2, в, г**). Таким образом, в исходной бронзе наблюдается фазовая неоднородность.

Облучение жидкой фазы НЭМИ в течение 5 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, а характер распределения олова имеет обратную зависимость, чем медь (см. **рис. 2, а, б**).

Такой характер растворимости олова в твердом растворе можно объяснить измельчением электронного соединения $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ и уменьшением его количества под воздействием НЭМИ, в конечном итоге частичным растворением электронного соединения.

В светлых включениях при облучении жидкой фазы НЭМИ в течение 5 мин содержание меди незначительно возрастает (~ 70 мас.%) и одновременно увеличивается в них содержание олова (~ 30 мас.%). В темных включениях наблюдается существенное увеличение содержания меди (~ 75 мас.%) и уменьшение концентрации олова (~ 25 мас.%, см. **рис. 2, г**).

Дальнейшее увеличение продолжительности облучения жидкой фазы НЭМИ до 15 мин (см. **рис. 2**) способствует уменьшению содержания меди и возрастанию растворимости олова в центре и периферии дендрита α -твердого раствора, при этом сохраняется также прямая ликвация меди и обратная ликвация олова в кристаллах α -твердого раствора. В компактных включениях эвтектоида содержание меди уменьшается, а концентрация олова скачкообразно возрастает.

В светлых включениях эвтектоида растворимость Cu и Sn возрастает по мере увеличения продолжительности облучения жидкой фазы. В темных включениях эвтектоида наблюдаются существенное увеличение содержания меди и уменьшение концентрации олова (~ 78 мас. % Cu и ~ 22 мас. % Sn, см. **рис. 2, в, г**).

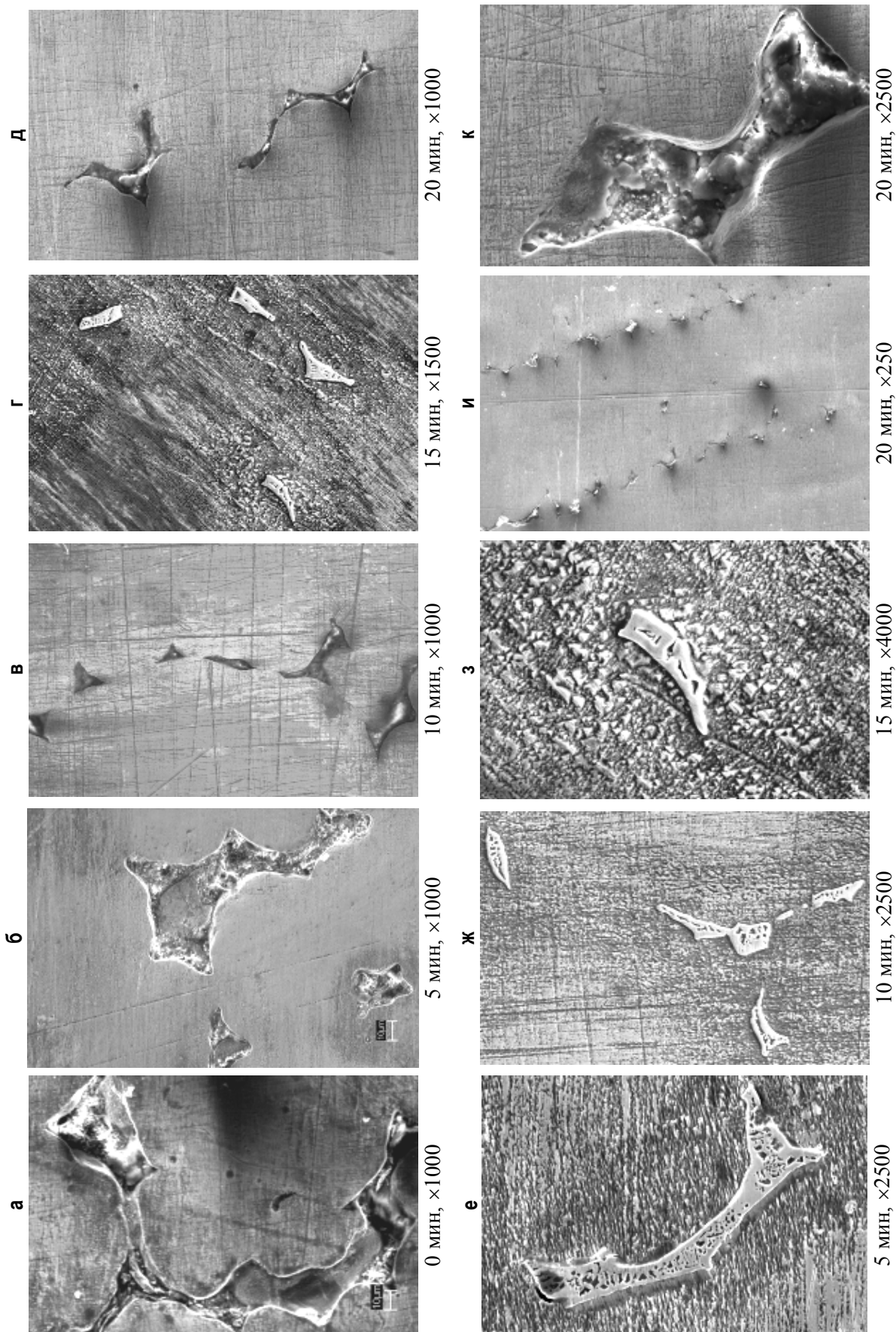


Рис. 1. Микроструктура бронзы, облученной НЭМИ

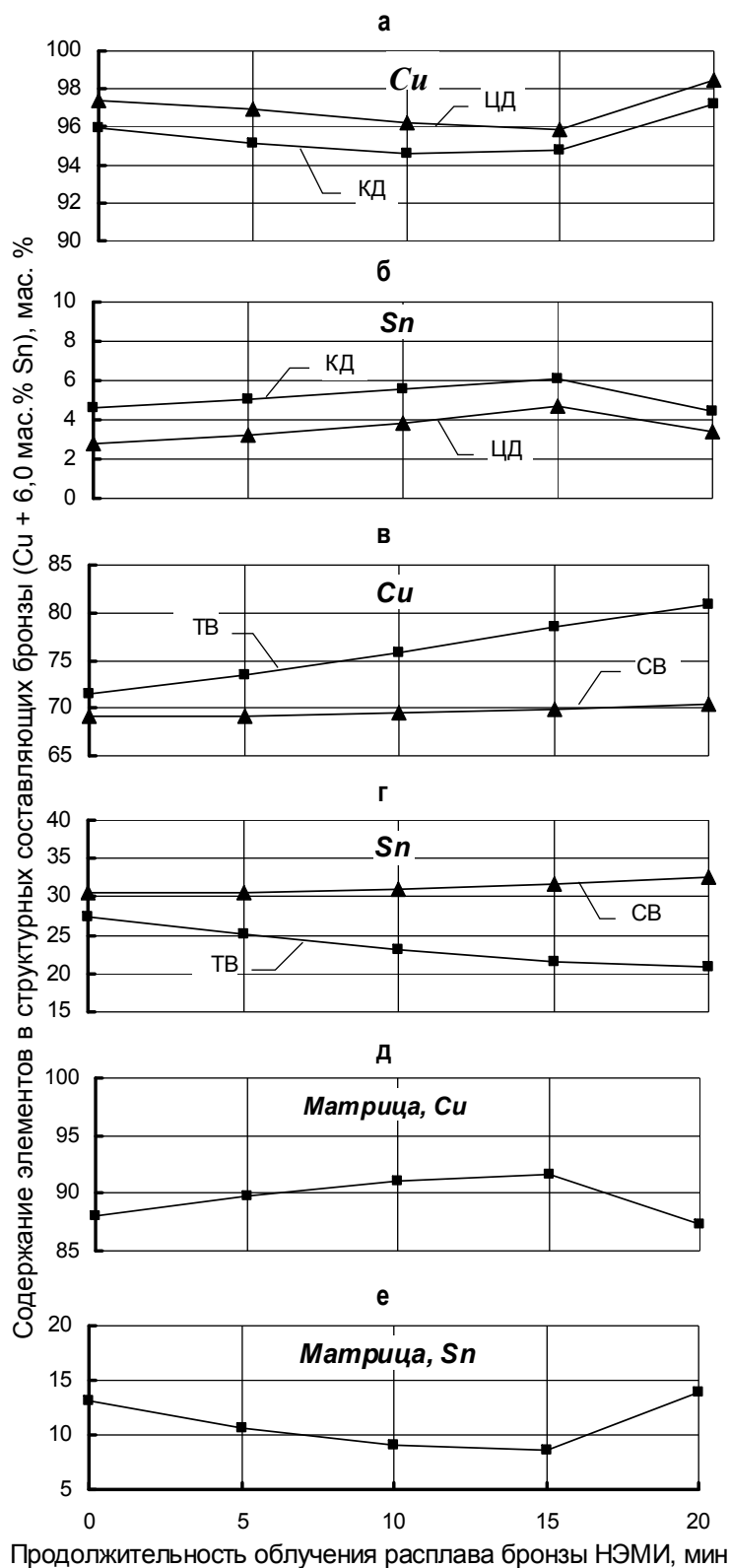


Рис. 2. Распределение элементов в различных структурных составляющих бронзы в зависимости от продолжительности облучения жидкой фазы НЭМИ

Следовательно, можно сделать вывод о том, что при облучении жидкой фазы возрастающей продолжительностью (до 10 мин) намечается тенденция увеличения растворимости олова в первичных дендритах α -твердого раствора и уменьшения ее в металлической матрице между дендритами α -твердого раствора (рис. 2, д, е). Последнее обстоятельство, по-видимому, должно способствовать кристаллизации мелкодисперсной электронной фазы типа $Cu_{31}Sn_8$ в составе эвтектоида и ее уменьшению.

При продолжительности облучения жидкой фазы НЭМИ, равной 20 мин, растворимость олова в первичных дендритах α -твердого раствора уменьшается, а в оставшейся части расплава (металлической матрице), наоборот, возрастает, что приводит к кристаллизации большего количества эвтектоида более крупного размера. Характер распределения Cu и Sn в светлых и темных включениях при этом сохраняется (см. рис. 2, в, г).

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение продолжительности облучения жидкой фазы до 15 мин включительно способствует возрастанию растворимости олова в дендритах α -твердого раствора. При дальнейшем увеличении продолжительности облучения НЭМИ растворимость олова в дендритах твердого раствора α уменьшается.
2. Растворимость меди в металлической основе, кристаллизующейся в последнюю очередь перед перитектическим превращением, изменяется по экстремальной зависимости с максимумом при 15 мин; содержание олова, наоборот, уменьшается, а затем возрастает до продолжительности облучения, равной 20 мин, что должно приводить к укрупнению эвтектоида и увеличению его количества.
3. В светлых включениях эвтектоида по мере увеличения продолжительности облучения до 20 мин возрастает незначительно растворимость Cu и Sn, а в темных включениях, наоборот, существенно возрастает содержание меди и уменьшается концентрация в них олова.

Таким образом, при облучении жидкой фазы НЭМИ существенно изменяются не только кристаллизационные параметры, физико-механические и эксплуатационные свойства [1–3], но и характер изменения растворимости олова в структурных составляющих оловянной бронзы и их количественное соотношение, а также габитус и дисперсность эвтектоида.

Наблюдаемые скачкообразные изменения кристаллизационных параметров, процесса структурообразования, физико-механических и эксплуатационных свойств бронзы и элементно-фазового состава α -твердого раствора и эвтектоида являются новым явлением, возникающим при облучении жидкой фазы НЭМИ определенной продолжительности.

Библиографический список

1. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) на кристаллизацию, структурообразование и физико-механические свойства меди и бронзы / Ри Э.Х., Ри Хосен, Бруй В.Н., Белых В.В. // Труды седьмого съезда литейщиков России. Новосибирск: Изд-во «Издательский дом «Историческое наследие Сибири», 2005. С. 278–283.
2. Облучение при плавке жидкой меди и бронзы наносекундными электромагнитными импульсами / Ри Э.Х., Дорофеев С.В., Крымский В.В., Ри Хосен, Кухаренко Е.Б. // *Металлургия машиностроения*. 2006. № 4. С. 13–17.
3. Свойства алюминия и силумина после облучения наносекундными электромагнитными импульсами / Ри Хосен, Ри Э.Х., Дорофеев С.В., Крымский В.В., Кухаренко Е.Б. // *Металлургия машиностроения*. 2006. № 4. С. 18–20.

УДК 621.74

И. Е. Илларионов, А. М. Столяров

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛ ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ

1. Влияние пьезо- и трибоэлектрического эффектов на свойства смесей

Большое влияние на свойства формовочных смесей оказывает их основа – кварцевый песок. Химическая природа, количество и состав глинистой составляющей во многом определяют свойства формовочных песков и смесей. Этот вопрос получил значительное развитие в работах российских и зарубежных ученых. В работах П.П.Берга [1] отмечено, что зерно кварца несет на себе электрический заряд. Однако явление электризации зерен песка вследствие неизученности не находит практического применения в технологических процессах литейного производства.

Взаимодействие воды с зернами кварца, как и другими минералами, носит адсорбционный характер, вызванный наличием электрического силового поля на поверхности твердого тела.

Среди многочисленных факторов, влияющих на формирование прочности формовочных смесей (зерновой и минералогический состав песка, химический и минералогический состав глин, специальные добавки, степень перемешивания и т.д.), определенное значение имеют электрические свойства применяемого песка, которые характеризуются диэлектрической проницаемостью, удельным сопротивлением и диэлектрическими потерями [2, 3 и др.].

Применяемые кварцевые пески состоят из минерала кварца, отличительной особенностью которого является приобретение электрического заряда под действием механических напряжений. Сущность этого так называемого пьезоэлектрического эффекта состоит в том, что при механическом воздействии на кристалл кварца механическая энергия переходит в электрическую, в результате чего поверхности кварца приобретают электрические заряды (пьезоэлектрический эффект) [4].

В зависимости от направления усилий пьезоэлектрический эффект подразделяют на продольный и поперечный. В первом случае под действием усилия, направленного вдоль электрической оси, происходит вклинивание атома между атомами кислорода, а во втором – под действием усилия, направленного перпендикулярно электрической оси, происходит смещение атомов кремния и кислорода.

В результате указанных процессов на поверхности зерен кварца возникают электрические заряды. Согласно [5, 6 и др.] явления пьезоэлектрического эффекта для простых случаев могут быть описаны следующими уравнениями:

$$Q = dF; P = d\sigma; P = e\varepsilon,$$

где Q – величина электрического заряда; P – электрическая поляризация; F – механическая сила; σ –