

**СЛАБОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ КАК «ИНГИБИТОР» ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ,
ИНИЦИИРОВАННОГО В КРИСТАЛЛАХ АТМ УФ-ОБЛУЧЕНИЕМ**

В.Г. Маренец, асп., К.С. Туева, асп., А.П. Родзевич, ст. преподаватель, Е.Г. Газенаур, к.ф.-м.н., доц.
Кемеровский государственный университет, 650043, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел. (3842)580605*

**Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского*

Томского политехнического университета

652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (38451)62248

E-mail: nimez@tpu.ru

Проблема управления скоростью твердофазной химической реакции является одной из центральных проблем физики и химии твердого тела. Особое место в этой проблеме занимает изучение возможностей управления чувствительностью и стабильностью взрывчатых веществ (ВВ). Фундаментальный аспект таких исследований связан с тем, что в случае азидов тяжелых металлов (АТМ), речь фактически идет о поиске путей управления новым классом химических реакций - твердофазными цепными реакциями, роль активных частиц в которых выполняют электронные возбуждения кристаллической решетки. Прикладное значение определяется вопросами безопасности ВВ, охватывающими очень широкий круг проблем (хранение, транспортировка, уничтожение и т.д.).

Азид серебра (AgN_3) – традиционный модельный объект химии твердого тела, способный под действием внешних факторов различной природы претерпевать необратимые превращения с образованием инертных конечных продуктов (молекулярного азота и металла), легко анализируемых традиционными физико-химическими методами. Азиды просты по химическому составу и структуре. Для AgN_3 и азид свинца (PbN_6) достаточно подробно исследованы физико-химические свойства, определена зонная структура и параметры кристаллической решетки [1]. Близость к галогенидам металлов дает возможность рассматривать неорганические азиды в качестве модельных для создания теории быстрых реакций в твердых телах. Практическая значимость кристаллов азидов серебра и свинца определяется, прежде всего, возможностью использования их в качестве взрывчатых веществ с высокой инициирующей способностью [1], а также чувствительных датчиков измерения сверхнизких электрических и магнитных полей.

Облучение светом в области собственного поглощения, инициирует в кристаллах АТМ процессы разложения, качественная модель которых включает, наряду с генерацией в объеме образца неравновесных электронов и дырок, перенос их к поверхности кристалла в реакционные области, образованные краевыми дислокациями, а также реализацию в реакционных областях цепной химической реакции [2-4]. Процесс разложения азидов после УФ-облучения протекает длительное время после энергетического воздействия (минуты), кривая пост-процессов носит затухающий колебательный характер, связанный с изменением во времени соотношения концентрации свободных электронов и дырок в реакционных областях [3,5]. Наблюдаемые процессы лимитируются ионной стадией (дрейф межузельных катионов серебра или свинца), амплитуда колебаний определяется приповерхностным изгибом зон в реакционных областях, который по оценкам составляет 0,1-0,2 эВ.

О возможности влияния электрического поля на твердофазное разложение различных твердых веществ известно давно. Так, изучая влияние электрического поля на термическое разложение пресованных таблеток оксалата серебра, азидов бария и серебра, авторами [6,7] установлено, что реакция разложения начинается на поверхности исследуемых веществ, а внешнее электрическое поле приводит к загибу зон на поверхности, что влияет на энергию переноса, а также на скорость данного процесса. В работе [7] указывается на возможность использования электрического поля как метода для исследования механизма разложения и как способа стимулирования реакции разложения твердых веществ. Влияние электрического поля на дислокационную структуру кристаллов рассмотрено в работе [8]. В связи с проводимыми в последнее время исследованиями влияния бесконтактного электрического поля на процесс медленного твердофазного разложения, инициированного в кристаллах АТМ электрическим полем [9], а также имеющимися результатами по влиянию слабых электрических полей на процесс кристаллизации и взрывную чувствительность этих материалов [10-12], в настоящей работе сделана попытка обнаружить влияние бесконтактного электрического поля на процесс фотохимического разложения нитевидных кристаллов азидов серебра и свинца. При этом, в качестве основных задач исследования определены: исследование влияния бесконтактного постоянного и переменного электрических полей различной конфигурации на кинетику процессов, протекающих в нитевидных кристаллах азидов серебра и свинца после ультрафиолетового (УФ) облучения; изучение влияния низких и сверхнизких (до 10^{-4} В/м) электрических полей на процесс фотохимиче-

ского разложения АТМ; разработка методов управления реакционной способностью энергетических материалов.

Предложенные в работе методы управления скоростью твердофазной химической реакции с помощью слабых электрических полей, моделирующих реальные условия хранения и транспортировки взрывчатых веществ, могут быть в дальнейшем использованы и для других материалов, проявляющих высокую чувствительность к внешним воздействиям.

В качестве объектов исследования использовали нитевидные кристаллы азидов серебра и свинца со средними размерами $15 \times 0,1 \times 0,03 \text{ мм}^3$ и $5 \times 0,7 \times 0,03 \text{ мм}^3$ соответственно. Концентрация основных примесей (Fe, Si, Ca, Mg, Al, Na) в полученных нитевидных кристаллах азидов серебра и свинца определялась полярографическим и комплексометрическим анализом и не превышала $10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для проведения экспериментальных исследований готовили образцы азидов свинца и азидов серебра в планарном варианте геометрии: на предварительно обезжиренную этиловым спиртом слюдяную подложку кристаллы наклеивали за оба конца клеем БФ-6. В этом случае возможно фиксирование и объема выделившегося газообразного продукта, и наблюдение топографии распределения его по образцу. Для проведения экспериментальных исследований образцы, приготовленные вышеуказанным способом, облучали УФ-светом с длиной волны 360 нм с помощью ртутной лампы ДРШ-100 (для выделения указанной длины волны использовали интерференционные светофильтры). Расстояние между источником и образцами было постоянным и составляло 10^{-1} м , время облучения для азидов свинца и серебра – 50 с и 35 с соответственно. Интенсивность освещения, оцененная по результатам актинометрии с использованием химического ферриоксалатного актинометра, составляла $1,167 \times 10^{15}$ квант/(см*с) и $1,924 \times 10^{15}$ квант/(см*с) для азидов свинца и серебра соответственно. Количественный анализ продуктов фотохимического разложения проводили волюмометрическими методами [13], контролируя разложение в анионной подрешетке (по образуемому при разложении газообразному продукту). Промежуточный продукт разложения АТМ, инициированного УФ-облучением, выделяли путем выдержки облученных образцов не менее суток (время образования кластера промежуточного продукта [14]) при комнатной температуре. Поскольку известно, что реакционные области в кристаллах АТМ совпадают с местами выхода дислокаций на поверхность [2,4], возникает необходимость выявления дислокаций. Контрастные ямки травления [15] получались при травлении кристаллов AgN_3 в 1 N водном растворе тиосульфата натрия, PbN_6 – в 3 N водном растворе уксуснокислого аммония. Амплитудой и длительностью процессов, протекающих в АТМ после УФ-облучения, а также процессом накопления промежуточного продукта управляли с помощью: 1) бесконтактного поперечного электрического поля, напряженность которого изменяли в интервале $10^2 \div 10^3 \text{ В/м}$. Время хранения облученного образца в электрическом поле составляло 5 минут. 2) бесконтактного продольного электрического поля, напряженность которого изменяли в интервале $10^4 \div 3 \cdot 10^4 \text{ В/м}$. Электрическое поле прикладывали одновременно с началом облучения. Поскольку бесконтактное электрическое поле является причиной дрейфа не только дырок, но и ионных дефектов, дрейф которых может привести к поляризации кристалла и «гашению» реакции разложения, инициированной УФ-облучением, в работе также использовали переменное электрическое поле частотой 50 Гц. Влияние энергетически слабых электрических полей различной конфигурации на процессы разложения, инициированные в нитевидных кристаллах азидов серебра и свинца УФ-облучением изучали в ячейке, исключаяющей внешнее воздействие на процесс разложения. Для исключения влияния помех от электроприборов использовали элемент питания на 1,5 В. Напряженность постоянного бесконтактного электрического поля варьировали с помощью делителя (набор безындуктивных сопротивлений) в пределах от 10^4 до 10^3 В/м . При изучении влияния поля на процесс образования промежуточного продукта образцы хранили в бесконтактном электрическом поле различной конфигурации в течение 24 часов. Для изучения процессов, протекающих в АТМ после энергетического воздействия, использовали методику измерения подвижности носителей заряда [5].

При исследовании разложения кристаллов азидов серебра и свинца объем выделившегося газа для разных образцов может значительно отличаться. Количество выделившегося газа определялось по результатам измерений диаметров пузырьков молекулярного азота при числе параллельных опытов n равно 10. Для расчета погрешностей пользовались методами математической статистики. Выборка результатов определения количества выделившегося газа имеет приближенно нормальный закон распределения. Разброс экспериментальных данных количества выделившегося газа при 95% доверительной вероятности составляет не более 15%. Отношение объема выделяющегося газа к площади поверхности кристалла – относительный объем газообразного продукта разложения АТМ в

анионной подрешетке обозначим β . Обработка экспериментальных результатов проводилась на ПК с использованием программ «Microsoft Excel» и «Mathcad 5.0».

Последние исследования фотохимического разложения азидов тяжелых металлов показали, что в этих материалах длительное время (десятки минут) после окончания воздействия протекают процессы разложения (пост-процессы), сопровождаемые генерацией неравновесных электронов и дырок, соотношение концентрации которых периодически меняется в процессе хранения подвергнутых внешнему воздействию образцов [3]. Пост-процессы для азидов серебра и свинца качественно совпадают, однако, различаются периодом колебаний. Характерное значение времени периода пост-процессов (минуты) позволяет сделать предположение о связи их с ионными процессами, например, со стадией роста металлических кластеров, скорость образования которых лимитируется диффузионно-дрейфовой стадией. Исследование экспериментальных кривых с помощью метода нормированного размаха Херста позволяет утверждать, что кинетика процессов, протекающих в нитевидных кристаллах азидов серебра и свинца, не является случайным процессом, поскольку показатель Херста принимает значение $0,9 \div 1$, что соответствует процессам с памятью.

Известно, что нитевидные кристаллы азидов серебра и свинца разлагаются под действием внешних энергетических факторов с образованием металла и азота. Последние исследования процессов, протекающих в нитевидных кристаллах азидов серебра после энергетического воздействия, показали, что в объеме кристалла реакция разложения протекает до образования промежуточного продукта, идентифицированного как N_6 , свойства и методики выделения которого хорошо изучены [2,14]. При анализе промежуточного продукта разложения азидов свинца, инициированного УФ-облучением, отмечено существование полосы (550 ± 10 нм) с увеличением объема выделяющегося газообразного продукта в девять и более раз. По-видимому, в продуктах разложения азидов свинца, инициированного УФ-облучением, содержатся более длинные цепи (исследование этого эффекта требует разработки дополнительных методик). Механизм процессов, протекающих в нитевидных кристаллах азидов серебра и свинца после УФ-облучения, до конца не выяснен. На качественном уровне его можно рассматривать как совокупность следующих процессов [3]: генерацию при энергетическом воздействии в объеме кристалла электронов и дырок; перенос их к поверхности кристалла в реакционные области, образованные краевыми дислокациями в приповерхностной области кристалла; реализацию в реакционных областях цепной химической реакции с образованием в объеме кристалла промежуточных продуктов.

В течение длительного времени после энергетического воздействия в кристалле находятся заряженные частицы и, следовательно, на протекание пост-процессов фотохимического разложения азидов должно оказывать влияние электрическое поле. Как показали результаты экспериментального исследования, с увеличением напряженности, приложенного в момент облучения бесконтактного продольного электрического поля, амплитуда пост-процессов линейно уменьшается. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с представлениями о дислокационном механизме реакций, протекающих в исследуемых образцах после энергетического воздействия [3,4]. Дополнительное действие электрического поля, приложенного в момент облучения, приводит к тому, что часть дислокаций выходит из кристалла и, следовательно, уменьшается количество реакционных областей (количество РО определяли: методом ямок травления и по количеству мест газовыделения). Это ведет к изменению дислокационной структуры АТМ, а значит, и реакционной способности этих материалов. Поскольку дислокации в кристаллах АТМ отрицательно заряжены [9], возможно направленное смещение дислокаций в электрическом поле и появляется возможность, с помощью электрического поля, управлять скоростью их направленного движения. Зная подвижность дислокаций в азидов серебра и свинца, которая составляет 10^{-4} см² В⁻¹с⁻¹ и 10^{-5} см² В⁻¹с⁻¹ соответственно [9], можно рассчитать время, необходимое для смещения дислокаций на определенное расстояние под действием продольного электрического поля, приложенного в момент облучения. Если облучение проводить в продольном электрическом поле напряженностью $E > 3 \cdot 10^4$ В/м, то можно полностью вывести дислокации из кристалла, после чего кристалл является стабильным по отношению к УФ-облучению в течение, не менее, 24 часов. Таким образом, изменяя, с помощью бесконтактного продольного электрического поля, плотность дислокаций в нитевидных кристаллах азидов серебра и свинца мы можем не только управлять пост процессами, протекающими в них после облучения, но и задавать «рисунок» разложения.

Хранение облученных образцов в поперечном бесконтактном электрическом поле в течение пост-процессов показало значительное влияние поля на амплитуду протекающих процессов, что, по

нашему мнению, можно объяснить следующим образом. Как известно, реакция разложения азидов, инициированная УФ-облучением, протекает в реакционных областях, образованных краевыми дислокациями в приповерхностной области кристалла. В реакционной области существует приповерхностный изгиб энергетических зон и, с помощью поперечного электрического поля можно изменять величину изгиба зон (с учетом большей эффективности бесконтактного электрического поля), что ведет в зависимости от полярности электрического поля, к уменьшению либо увеличению скорости химической реакции (поскольку дырки рассматриваются в качестве реагентов). Кроме этого, столь эффективное влияние бесконтактного постоянного поперечного электрического поля на кинетику пост-процессов можно связать с переносом ионов серебра Ag^+ на поверхность кристалла в случае приложения заряженной отрицательно обкладки конденсатора к поверхности кристалла, на которую воздействовали УФ-светом. Экспериментальные результаты показали, что поперечное бесконтактное электрическое поле оказывает влияние и на процесс образования промежуточного продукта разложения азидов (см. рис. 1). С помощью поперечного бесконтактного поля удалось существенно уменьшить время формирования кластера промежуточного продукта.

Таким образом, предложенная выше методика управления амплитудой процессов, протекающих в азиде после УФ-облучения, с помощью бесконтактного электрического поля позволяет управлять не только скоростью твердофазной химической реакции, а значит и реакционной способностью энергетических материалов при данном виде воздействия, но и временем появления промежуточного продукта в виде пузырька газа, что существенно важно в методическом плане его обнаружения.

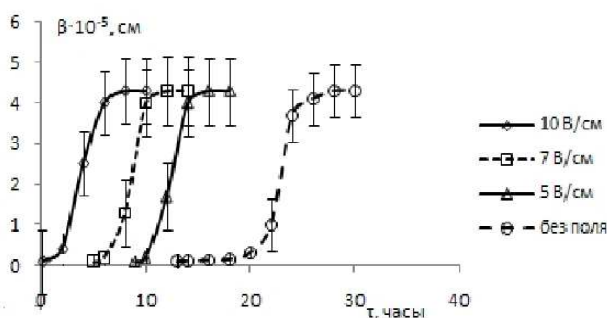


Рис. 1. Зависимость относительного объема промежуточного продукта от времени хранения образца при различных напряженностях поперечного бесконтактного электрического поля (для AgN_3)

Экспериментальные исследования показали значительное влияние энергетически слабого бесконтактного постоянного поперечного электрического поля на амплитуду и длительность процессов, протекающих в нитевидных кристаллах азидов серебра и свинца после УФ-облучения. Хранение облученных образцов в слабом поперечном бесконтактном электрическом поле независимо от полярности поля ведет к затуханию реакции разложения. Бесконтактное электрическое поле является причиной дрейфа не только дырок, но и ионных дефектов. Подвижность последних на несколько порядков меньше, чем дырок. Дрейф ионов приводит к поляризации кристалла и «гашению» реакции разложения, инициированного УФ-облучением. Используя переменное электрическое поле определенной частоты, можно избавиться от проблемы ионной поляризации кристалла, и провести более достоверные, особенно в случае использования малых электрических полей, исследования. Наиболее сильное влияние на физико-химические процессы, протекающие в исследуемых материалах после энергетического воздействия, оказывает переменное поле с частотой 50 Гц в диапазоне напряженностей $0,1 \div 0,2$ В/мм [2], поэтому в работе использовали именно эту частоту переменного бесконтактного электрического поля. Для наиболее наглядного представления влияния слабого бесконтактного электрического поля на процессы, протекающие после УФ-облучения в АТМ, построен график зависимости амплитуды первых максимумов на кривой кинетики пост-процессов от значения напряженности полей различной конфигурации (см. рис. 2. а,б). Наблюдается «гашение» реакции разложения, инициированного УФ-облучения, при любой конфигурации поля относительно кристалла. Таким образом, слабое бесконтактное электрическое поле можно рассматривать как ингибитор твердофазной химической реакции в азиде серебра и свинца, а также как способ управления процессом разложения азидов тяжелых металлов.

Поскольку химическая реакция в анионной подрешетке АТМ протекает до образования в объеме образца относительно устойчивого промежуточного продукта [14], изучение его образования в слабом бесконтактном электрическом поле позволит приблизиться к пониманию механизма влияния поля на процесс твердофазного разложения кристаллов. Экспериментально установлено что количество накопленного промежуточного продукта при хранении облученных УФ-светом образцов в электрическом поле напряженностью 10^{-1} – 10^{-6} В/см существенно уменьшается. Кроме того, наблюдается корреляция между количеством накопления промежуточного продукта и относительным объемом конечного газообразного продукта разложения азидов. Уменьшение количества образующегося промежуточного продукта в присутствии слабого бесконтактного поля позволяет косвенно судить о влиянии слабого электрического поля, прежде всего, на стадию образования промежуточного продукта твердофазного разложения азидов.

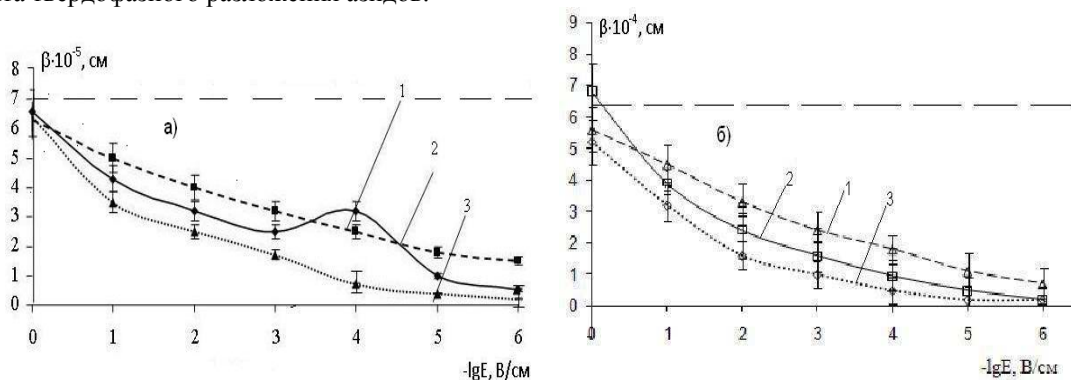


Рис. 2. Зависимость амплитуды первых максимумов на кривой кинетики пост-процессов фотохимического разложения нитевидных кристаллов а) азида серебра и б) азида свинца от напряженности: 1. бесконтактного продольного; 2. бесконтактного поперечного; 3. переменного (частота 50 Гц) электрического поля; пунктирная линия – величина первого максимума на кривой пост-процессов разложения в отсутствие поля

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных экспериментальных результатов для целенаправленного изменения реакционной способности энергетических материалов. Предложенные в работе методы управления процессом фотохимического разложения АТМ с помощью бесконтактного электрического поля могут быть использованы при исследовании физико-химических процессов, инициированных внешним воздействием в других материалах.

Литература.

1. Багал, Л. И. Химия и технология инициирующих взрывчатых веществ. / Л. И. Багал. - М.: Машиностроение, 1975. - 456 с.
2. Захаров, В.Ю. Медленное разложение азидов серебра и свинца / В.Ю. Захаров, В.И. Крашенинин.- Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – С. 168.
3. Крашенинин, В.И. О модели фотохимического разложения нитевидных кристаллов азидов серебра и свинца / В.И. Крашенинин, Е.Г. Газенаур, Л.В. Кузьмина, Д.С. Макеев. // Вестник ТГУ, 2006.- №19. - С. 100-102.
4. Захаров, В.Ю. Физико-химические процессы в азидовых тяжелых металлов и дислокационная структура / В.Ю. Захаров, В.И. Крашенинин, Е.Г. Газенаур, А.И. Гасанов. // Журнал «Известия ВУЗов». Серия Физика. - 2002.- №6. - С. 17-21.
5. Патент РФ. № 93043944/25, 27.05.97. Способ визуального определения дрейфовой подвижности в азидовых тяжелых металлов / В.И. Крашенинин, Е.Г. Газенаур, А.Ю. Сталинин // № 93043944/25, 27.05.97, Бюл. №15. - С. 1-8.
6. Савельев, Г.Г. Влияние электрического и магнитного полей на термическое разложение твердых веществ // Труды 1 конференции молодых ученых-химиков г. Томска. - Изд. Томского ун-та. - 1970. - С. 71-73.
7. Кабанов, А.А. Влияние электрического поля на термическое разложение твердых веществ / А.А. Кабанов, Е.М. Зингель // Успехи химии, 1975. - Т.44. - №7. - С.1194-1216.

8. Патент РФ. № 93043944/25, 27.05.97. Способ визуального определения дрейфовой подвижности в азиды тяжелых металлов / В.И. Крашенинин, Е.Г. Газенаур, А.Ю. Сталинин // № 93043944/25, 27.05.97, Бюл. №15. С. 1-8.
9. Zakharov, V.Yu. The control of solid phase decomposition of silver azide by noncontact electric field / V. Yu. Zakharov, V. I. Krasheninina, L. V. Kouzmina, Yu. A. Zakharov // Solid State Ionics. - 1997. - V. 101-103. - P. 161-164.
10. Газенаур, Е.Г. Влияние бесконтактного электрического поля на взрывную чувствительность кристаллов азидов серебра / Е.Г. Газенаур, В.И. Крашенинин, Л.В. Кузьмина, А.П. Родзевич // Материаловедение. 2010. - № 4. - С. 14-19.
11. Крашенинин, В.И. Управление медленным и взрывным разложением азидов серебра бесконтактным электрическим полем / В.И. Крашенинин, Е.Г. Газенаур, Л.В. Кузьмина, А.П. Родзевич // Бутлеровские сообщения. - 2010. - Т. 23. - №14. - С. 66-72.
12. Крашенинин, В.И. Способы управления стабильностью азидов серебра / В.И. Крашенинин, Л.В. Кузьмина, Е.Г. Газенаур, О.В. Целиковская // Ползуновский вестник. 2009. - №3. - С. 48-51.
13. Heal, H. G. A microgaseometric procedure / H. G. Heal // Nature. - 1953. - V. 172. - P. 30.
14. Газенаур, Е.Г. О продуктах медленного разложения азидов свинца и серебра / Е.Г. Газенаур, В.И. Крашенинин, А.И. Гасанов, В.Ю. Захаров. - Деп. в ВИНТИ. №2662-В00. Кемерово, 2000. - 19 с.
15. Сангвал, К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение / К. Сангвал.- М.: Мир, 1990. - 492 с.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ МЕТАЛЛОВ

М.А. Кузнецов, ст. преподаватель, Д.С. Карцев, студент гр. 10А12

Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского

Томского политехнического университета

652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26

Модификатор (от позднелат. *modifico* – видоизменяю, меняю форму) – вещество, которое существенно изменяет структуру и свойства обработанного им металла или сплава. Эффект от такой обработки называется модифицированием [1]. Модифицирование – процесс активного регулирования первичной кристаллизации или изменения степени дисперсности кристаллизующихся фаз путём введения в расплав добавок отдельных элементов или их соединений [2]. Модифицированием можно добиться измельчения макро и микроструктуры; фазовых составляющих эвтектик; первичных кристаллов; формы, а также изменения размера и распределения неметаллических включений. Модифицирование металлов можно произвести несколькими способами: вводом в расплав добавок-модификаторов; применением различных физических воздействий (регулирование температуры расплава, предварительное охлаждение расплава при переливе, суспензионная разливка, литье в температурном интервале кристаллизации, вибрация, ультразвук, электромагнитное перемешивание); комбинированными способами, сочетающие вышеизложенные.

По природе воздействия модификаторы можно разделить на три вида: модификаторы 1-го рода, 2-го и 3-го рода. Модификаторы 1-го рода влияют на структуру за счет изменения энергетических характеристик (энергия активации и поверхностное натяжение) зарождения новой фазы. Модификаторы 2-го рода изменяют структуру, влияя на нее, как зародыши твердой фазы. Модификаторы 3-го рода – холодильники / инокуляторы – снижают температуру металла и повышают скорость кристаллизации, тормозя тем самым развитие ликвации элементов.

Наибольшее применение получили модификаторы 1-го рода. К ним относят примеси, неограниченно растворимые в жидкой фазе и мало растворимые в твердой фазе (0,001...0,1%). Эти примеси в свою очередь можно разделить на два типа: не изменяющие поверхностные свойства кристаллизующейся фазы и меняющие поверхностное натяжение на границе расплав-кристалл. Модификаторы первого типа могут тормозить рост твердой фазы только за счет концентрационного барьера на границе расплав-кристалл. При этом не происходит изменения энергетических характеристик процесса. Добавки второго типа, снижают поверхностное натяжение на границе расплав-кристалл и избирательно концентрируются на поверхности кристаллов (дендритов). Таким образом, ввод модификаторов 1-го рода сопровождается изменением поверхностного натяжения и энергии активации в противоположных направлениях, одновременно измельчается макроструктура и укрупняется микроструктура, т.е. оказывается комплексное воздействие на макро- и микроструктуру. Модификаторы 1-го рода представлены в таблице 1 [3].