

О.Г.Сидоренко, А.И.Бабаченко, И.П.Федорова, А.П.Сухой

## ОБ ИСТОЧНИКЕ ПОНИЖЕННОЙ СПОСОБНОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ К ВЫЯСНЕНИЮ ПРИРОДЫ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИХ РАЗВИТИЯ

Рассмотрены гипотезы о природе закономерностей развития фазовых превращений, используемые для развития теоретических положений. Установлено, что в соответствии с принятым в настоящее время методическими подходами при исследовании природы закономерностей развития фазовых превращений учитываются только вторичные результаты этого процесса. Достаточную надежность результатам исследований может обеспечить лишь при определении времени начала и окончания фазовых превращений.

**фазовые превращения, методические подходы, время начала и окончания фазовых превращений**

**Современное состояние вопроса.** Вопрос о пониженной способности современной теории фазовых превращений к выяснению природы выявляемых закономерностей их развития определился в процессе анализа формирования структуры арматурного проката, термически упрочняемого в потоке прокатных станов с применением способа прерывистой закалки. Суть этого способа состоит в том, что закалку ведут не в один длительный период интенсивного охлаждения, а в два или несколько коротких периодов такого охлаждения с паузами между ними. При таком способе закалки в прилегающем к поверхности проката мартенситном слое начали обнаруживать достаточно развитые включения избыточного феррита или колонии перлита. При этом помимо вопроса о самой возможности формирования в названных условиях выявляемых структур, неожиданной была и та скорость, с которой должны были бы развиваться центры превращений, чтобы достигать выявляемых размеров [1]. Так, суммарная длительность первого периода интенсивного охлаждения и следующей за ним паузы, в течение которой только и могут развиваться превращения аустенита диффузионного типа, зачастую завершалась еще до появления самых первых признаков начинающегося распада аустенита, обнаруживаемых при непрерывном охлаждении стали с тем же химическим составом. И в это же время при прерывистой закалке площадь, занимаемая в мартенситной матрице колониями перлита, в отдельных случаях уже могла достигать 10% общей площади структуры.

Однако наиболее неожиданным было то, что на основе положений, устоявшихся за многие десятилетия в теории фазовых превращений, не удавалось сформулировать даже самую общую гипотезу, с помощью которой можно было бы приблизиться к пониманию природы выявляемых закономерностей формирования структуры арматурного проката, термически упрочняемого с применением способа прерывистой закалки. В свя-

зи с этим было предпринято исследование по выявлению причин, ответственных за сложившуюся в теории фазовых превращений ситуацию.

Для достижения поставленной цели, прежде всего, были проанализированы методические особенности, с помощью которых в настоящее время выполняют исследования кинетики фазовых превращений. Развития фазовых превращений в большинстве случаев достигают путем переноса анализируемых образцов в некоторую среду с температурой, отличающейся от температуры образца. Если при этом, например, исходная температура образца была более высокой, а среды – более низкой, чем температура исследуемого фазового превращения, то это превращение произойдет на определенном этапе понижения температуры образца.

При регистрации изменений среднemasовой температуры образцов на получаемых при этом кривых охлаждения (рисунок) выявляют участки с последовательно замедляющейся скоростью понижения температуры, в пределах времени распространения, при котором фазовый состав материала образца остается постоянным. Первый из этих участков начинается от исходного значения температуры образца и завершается при достижении температуры, соответствующей точке 2. Второй начинается при температуре, соответствующей точке 6 и завершается после того, как температура образца сравнивается с температурой среды.

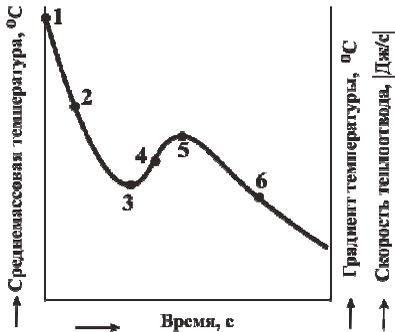


Рисунок. Изменения среднemasовой температуры образца, в котором на определенном этапе понижения температуры происходит неинвариантное фазовое превращение

Между первым и вторым участками термограммы находится еще один участок, распространяющийся от точки 2 и до точки 6, в пределах которого температура может не только понижаться, но и повышаться. Но при этом даже ее понижения происходят по закономерностям, отличающимся от тех, которые наблюдаются в пределах первых двух участков. В пределах времени распространения участка термограммы с подобными изменениями температуры в анализируемом образце происходит превращение одних фаз в другие, сопровождающееся выделением скрытой теплоты превращения. Отклонение закономерностей изменения температуры в пределах участка кривой охлаждения, находящегося между точками 2 и 6 от тех участков, в пределах распространения которых изменений фазового состава образца не происходит, объясняют тем, что при развитии превращения отвод теплоты от образца в этом случае в большей или

меньшей мере компенсируется выделяющейся скрытой теплотой превращения [2].

С помощью единичной термограммы определяют среднемассовую температуру и время начала и окончания фазовых превращений, развивающихся при данных условиях охлаждения образца. Путем изменения исходной температуры анализируемого образца или низкотемпературной среды (далее – образец и среда), их объема (массы) или химического состава материала, из которого они состоят, то есть факторов, оказывающих влияние на условия охлаждения образца, изменяют скорость понижения среднемассовой температуры образца, достигаемую степень переохлаждения относительно теоретической температуры превращения, а также температуру и время начала и окончания фазовых превращений. При обработке серии термограмм, получаемых при изменениях одного из названных факторов, определяют зависимость кинетики превращений от этих факторов.

В дополнение к кривым охлаждения критические моменты в развитии фазовых превращений определяют также путем наблюдений за изменениями линейных параметров, механических и физических свойств образцов, а также путем металлографических наблюдений за ростом центров фазовых превращений. Однако степень отражения выявляемых с помощью традиционного методического подхода закономерностей развития фазовых превращений практически никогда не выходила за рамки графических или эмпирических построений. Более того, даже в пределах изменений значения одного и того же фактора, характеристику его влияния выполняют, как правило, с помощью словесных уточнений типа «выше – ниже, больше – меньше, раньше – позже» и т.п.[3]. Это являлось следствием того, что несмотря на огромный массив накопленных фактических данных оставалась невыясненной сама природа влияния на условия охлаждения, оказываемая применяемыми при исследованиях факторами. По этой причине не давали положительного результата и многочисленные попытки воспроизводства особенностей развития фазового превращения в зависимости от одного из воздействующего на образец фактора, по данным, полученным при применении другого фактора. В этом отношении характерным примером являются попытки построения термокинетической диаграммы на основе данных, полученных при построении диаграммы изотермического распада высокотемпературной фазы того же сплава.

В такой ситуации многим гипотезам о природе закономерностей развития фазовых превращений, не могло быть обеспечено достаточное обоснование. Но после определенного периода «привыкания» к таким гипотезам их уже начинали привлекать в качестве аргументов, подтверждающих обоснованность последующих гипотез. Так произошло, например, с оставшейся недоказанной гипотезой об обязательном растворении зародышей низкотемпературной фазы, которые образуются в высокотемпературной области. Тем не менее, эта гипотеза послужила доказательст-

вом обоснованности следующей гипотезы о том, что развитие превращения, за исключением особых случаев, возможно на основе только тех зародышей низкотемпературной фазы, которые образуются в объеме переохлажденной высокотемпературной фазы. Поэтому достоверность выводов по результатам исследований, выполненных с применением традиционного методического подхода, во многом может быть неоспоримой по сути лишь в том, что относится к констатации последовательности определенных событий, выявляемых в процессе наблюдений за развитием фазовых превращений.

Пониженная способность современной теории фазовых превращений к выяснению природы вновь выявляемых закономерностей, как это обнаружилось в случае с аномально повышающейся скоростью роста центров фазовых превращений диффузионного типа в арматурном прокате, термически упрочняемом с применением прерывистой закалки, явилась следствием показанного выше способа «совершенствования» этой теории.

**Изложение основных материалов исследования.** Подтверждаемая результатами экспериментальных исследований зависимость кинетики фазовых превращений от факторов, определяющих условия охлаждения, с одной стороны, а с другой – отсутствие положительного результата при попытках выявления закономерностей, определяющих взаимосвязь в их влиянии на фазовые превращения, свидетельствовали о присутствии в современных методиках исследований некоторого изъяна, препятствующего последовательному развитию теории фазовых превращений. С целью обоснования последнего предположения был выполнен повторный анализ особенностей строения той же, представленной на рис.1, кривой охлаждения, но с привлечением на этот раз положений термодинамики необратимых процессов.

С позиции термодинамики и образец, и среда, являвшиеся ранее самостоятельными, находившимися каждая в своем термодинамическом равновесии, системами, при соприкосновении друг с другом становятся подсистемами новой, теперь уже единой системы. В момент образования единой системы разница исходных температур  $\Delta T$  подсистем становится термодинамической силой, под влиянием которой в этой системе начинается самопроизвольный необратимый процесс перехода относительного избытка внутренней энергии, наблюдающегося в одной подсистеме, в подсистему с меньшим ее количеством. Выполняется этот переход в форме теплоты, и развивается до достижения во всех точках единой системы одной и той же температуры.

Для того, чтобы различать направление поступления теплоты в термодинамике условились знаком « $\leftarrow$ » обозначать выделяющуюся теплоту, а поглощаемую – « $\rightarrow$ ». Очевидно, количество теплоты, выделяемой одной подсистемой, равно количеству теплоты, поглощаемой другой подсистемой. Выделение теплоты в образце, как и ее поглощение низкотемпературной средой, являются реакцией каждого из них, направленной на ос-

лабление эффекта, вызванного приложенной термодинамической силой. Характерное развитие индуцируемых термодинамической силой процессов, направленное на ослабление эффекта воздействия этой силы, отражает принцип смещенного равновесия, он же принцип Ле Шателье–Брауна [4]. Исходная скорость перехода теплоты от одной подсистемы в другую зависит от величины термодинамической силы, появляющейся в момент образования единой системы. При рассмотрении единичного случая образования единой системы можно принять, что величина этой силы совпадает со значением разницы температур  $\Delta T$  образца и среды. Но при образовании единых систем даже с одним и тем же  $\Delta T$ , но с отличающимися, например, размерами анализируемых образцов, будет отличаться и скорость понижения их температуры. То есть, в общем случае абсолютная разность температур подсистем сама по себе свидетельствует лишь о самом факте присутствия термодинамической силы. Поэтому в термодинамике для достижения возможности сопоставления степени воздействия наведенной в различных условиях разницы температур, в качестве термодинамической силы принято называть не абсолютную величину этой разницы, а ее градиент  $gradT$ , то есть число градусов, на которые изменяется температура в пределах единицы теплофизической размерности образца.

Единица размерности образца  $A$  может быть определена с помощью следующего соотношения:

$$A = \frac{V_1 \cdot c_1}{V_2 \cdot c_2} \quad (1)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – объемы образца и среды соответственно;  $c_1$  и  $c_2$  – теплоемкости образца и среды соответственно.

Уравнение (1), в котором  $V_1/V_2$  – масштабный фактор, а  $c_1/c_2$  – теплофизический фактор, позволяет определить градиент температуры:

$$gradT = \frac{\Delta T}{A} = \Delta T \cdot \frac{V_2 \cdot c_2}{V_1 \cdot c_1} \quad (2)$$

Скорость перехода теплоты  $J$  от одной подсистемы к другой в зависимости от  $gradT$  отражает закон Фурье:

$$J = -\lambda \cdot gradT \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Но выделение теплоты одной подсистемой и ее поглощение – другой, происходят не сами по себе, а вследствие протекания в них определенных физических процессов. Первым из них следует назвать процесс, при котором выделение или поглощение теплоты происходит за счет убыли или приращения той части внутренней энергии системы, которая представле-

на энергией колебательного движения атомов. И выделение, и поглощение теплоты при этом процессе происходят одновременно во всех точках единой системы.

Теплоту, выделяющуюся или поглощаемую в процессе изменения частоты колебательного движения атомов, иногда называют физической. Показателем, обеспечивающим возможность количественной оценки способности материала к выделению (поглощению) физической теплоты, является теплоемкость.

В отличие от физической теплоты выделение или поглощения теплоты фазового превращения происходит за счет убыли или приращения той части внутренней энергии системы, которая представляет собой энергию взаимодействия между составляющими систему атомами или молекулами.

Для начала фазового превращения необходимо не только преодоление при охлаждении образца температуры начала фазового превращения, но и присутствие в объеме исходной фазы зародышей новой фазы. Превращение исходной фазы в новую, а, следовательно, и выделение теплоты превращения в отличие от физической происходит только в прилегающем к поверхности зародыша слое исходной фазы. А так как размеры начинающего рост зародыша очень малы, то незначительно и количество теплоты превращения, которое может быть получено на начальных этапах превращения. Но по мере увеличения размеров центра превращения и площади окружающей его поверхности, количество выделяющейся теплоты превращения возрастает.

Если в подсистеме имеется источник только физической теплоты, то именно он и обеспечивает то количество теплоты, которое подлежит к передаче ее в другую подсистему в соответствии с данным значением  $gradT$ . Если в подсистеме появился еще один источник теплоты, в данном случае это фазовое превращение, то с увеличением количества поступающей теплоты превращения соблюдение установленного уравнением (3) условия возможно только при последовательном уменьшении поступления на то же количество физической теплоты, и наоборот.

Опыты по исследованию влияния условий охлаждения на строение кривых охлаждения выполняют, как правило, при превышении массой среды не менее, чем в  $10^2$  массы образца. Поэтому на данном этапе выполнения анализа изменениями температуры среды можно пренебречь. И если при этом в качестве начала отсчета выбрать исходное значение температуры среды, то регистрируемые данные о среднемассовой температуре образца одновременно будут и данными о превышении температуры образца над температурой среды, то есть  $\Delta T$ . Последнее с помощью уравнения (2) может быть переведено в градиент температуры, что, в свою очередь, позволяет с помощью уравнения (3) определять и скорость отвода теплоты от образца в произвольный момент времени после начала его охлаждения. Для того же, чтобы оценку этого можно было выполнять

графически, на рис. 1, дополнительно к основной шкале, характеризующей превышение температуры образца над температурой низкотемпературной среды, нанесены еще и шкалы для градиента температуры и скорости отвода от него теплоты.

Как уже было отмечено, на представленной на рис. 1 кривой охлаждения в пределах участков, которые распространяются от точки 1 и до точки 2, а также от точки 6 и до усредненной по системе образец–среда температуры, непрерывное понижение среднемассовой температуры образца не сопровождается изменением его фазового состояния. То есть, в пределах распространения этих участков понижение температуры образца сопровождается выделением только физической теплоты. Но после преодоления температурой значения, соответствующего точке 2, начинается превращение высокотемпературной фазы в низкотемпературную. При этом на первом этапе этого процесса прогрессирующее увеличение количества поступающей теплоты превращения приводит к соответствующему уменьшению количества выделяющейся физической теплоты. На кривой охлаждения это отражает участок, распространяющийся от точки 2 и до точки 3.

В момент достижения значения, соответствующего положению на термограмме точки 3, понижение среднемассовой температуры образца прекращается. Это свидетельствует о том, что увеличившееся количество выделяющейся теплоты превращения сравнялось с тем количеством теплоты, которое диктует к отводу из образца сложившийся на этот момент градиент температуры. Начиная с этого момента исчезает необходимость привлечения к отводу от образца еще и физической теплоты.

При начавшемся фазовом превращении последовательное замедление скорости понижения температуры образца вплоть до соответствующего точке 3 минимального значения, а затем и начинающееся ее повышение, обеспечивается благодаря тому, что при выделении теплоты центры превращения приобретают температуру более высокую, чем температура окружающей их исходной фазы. В результате этого в пределах самого образца появляются и частный градиент температуры, и соответствующий этому частный теплообмен, направленный на выравнивание температуры по его сечению. А так как благодаря непрерывному выделению теплоты температура центров сохраняется более высокой, то такое выравнивание происходит сначала за счет сдерживания понижения, а затем и повышения температуры окружающего центры превращения остального объема образца.

Начавшееся после точки 3 повышение температуры образца продолжается в пределах времени распространения на термограмме участка, ограниченного точками 3 и 5. Но если при этом до достижения точки 4 скорость повышения температуры непрерывно возрастает, то после ее преодоления – начинает замедляться. Это замедление вызвано тем, что ранее разобщенные центры превращения достигают размеров, при которых на-

чинаются их соприкосновения друг с другом. В результате этого те участки поверхности центров превращения, по которым произошло соприкосновение, теряют способность к генерированию теплоты превращения. Поэтому по мере продолжающегося увеличения размеров центров и площади их соприкосновения, последовательно уменьшается и то количества теплоты превращения, которое ранее расходовалось на повышение температуры не испытывавшего превращения объема исходной высокотемпературной фазы.

Приобретение образцом соответствующего точке 5 максимального значения температуры свидетельствует о том, что вследствие замедляющейся при сокращении площади фронта превращения скорости выделения теплоты превращения достигнут предел, при котором фазовое превращение еще в состоянии самостоятельно обеспечить поступление теплоты в количестве, диктуемым градиентом температуры к отводу за пределы образца. При продолжающемся и после точки 5 уменьшении количества выделяющейся теплоты превращения, необходимое к отводу за пределы образца количество теплоты снова может быть обеспечено только при дополнительном привлечении к этому процессу выделения и физической теплоты. Об этом свидетельствует начавшееся понижение среднemasсовой температуры образца. Одновременное выделение теплоты превращения и физической теплоты продолжается вплоть до достижения образцом температуры, соответствующей точке 6 термограммы, после чего ее понижение происходит при отводе от образца только физической теплоты.

Таким образом, возможность адекватного толкования природы закономерностей, определяющих формирование кривой охлаждения находящегося в твердом состоянии образца, в котором на определенном этапе понижения температуры развивается фазовое превращение, была достигнута благодаря отношению к ней, как к результату регистрации последовательного изменения состояния одной из составных частей движущейся к новому термодинамическому равновесию системы. При этом отдельный учет степени участия в формировании кривой охлаждения и колебательного движения атомов, и фазового превращения, позволил установить, что:

- строение кривых охлаждения определяют изменения только той части общего количества содержащейся в системе внутренней энергии, которая представлена энергией колебательного движения составляющих систему атомов, так как изменения только последней сопровождаются изменениями температуры;

- фазовое превращение на строение кривой охлаждения оказывает влияние лишь косвенное влияние, отдавая теплоту превращения в прилегающую к фронту превращения матрицу. Благодаря этому при продолжающейся при непрерывном отводе от образца теплоты убыли общего количества содержащейся в нем внутренней энергии, наблюдается сдер-

живание убьли или даже увеличение количества той части внутренней энергии, которую составляет энергия колебательного движения атомов.

– фазовое превращение самодостаточным процессом не является, так как непрерывный отвод от фронта превращения выделяющейся там теплоты, что является обязательным условием для поступательного развития фазового превращения, может обеспечить только колебательное движение атомов, составляющих окружающую центры превращения матрицу.

– фазовое превращение к развитию привлекается только в качестве альтернативного колебательному движению атомов механизма выделения теплоты, способного в заданных термодинамических условиях обеспечить большую скорость ее поступления в расчете на единицу понижения температуры.

Значимость скорости, с которой происходит выделения теплоты превращения, как, собственно, и физической теплоты, подчеркивает еще один из принципов термодинамики необратимых процессов, называемый принципом максимальной скорости производства энтропии [5]. В соответствии с этим принципом, «подверженная действию заданных термодинамических сил система к своему конечному состоянию стремится кратчайшим возможным способом (с максимальным производством энтропии при приближении изолированной системы к состоянию с максимальной энтропией)». В применении к фазовым превращениям этот принцип указывает на то, что в заданных условиях отвода теплоты их развитие происходит таким образом, чтобы при этом была обеспечена максимально возможная скорость выделения теплоты превращения.

В целом выполненный с применением положений термодинамики необратимых процессов анализ представленной на рис.1 кривой охлаждения подтвердил, что в условиях термического действия в полном соответствии с принципом Ле Шателье–Брауна основным результатом, на достижение которого направлено развитие фазового превращения, является выделение теплоты. Однако, ее выделение при фазовых превращениях в материальных телах, находящихся в твердом состоянии, происходит только при выполнении работы по перестройке кристаллической решетки исходной фазы в кристаллическую решетку новой фазы. Другими словами, достижение возможности обмена энергией в форме теплоты при фазовых превращениях может быть обеспечено только при одновременном участии в этом процессе и второй формы обмена энергией, то есть работы.

Если фазовое превращение развивается при постоянном давлении, основным признаком выполнения работы является изменение объема образца. Признаками выполнения работы являются также изменения физико–механических свойств материала, из которого состоит образец. И объемные изменения образца, и изменения его физико–механических свойств легко выявляются инструментально. Благодаря этому кинетику фазовых превращений стали можно исследовать как с помощью результатов ана-

лиза кривых охлаждения, так и с применением данных о выполняемой при фазовом превращении работе.

Но выполняемая в условиях термического действия работа является всего лишь вторичным результатом развития фазового превращения. Вторичность этого результата определяется тем, что, в отличие от отвода теплоты от образца, его достижение зависит не от градиента температуры, как термодинамической силы, выводящей систему из термодинамического равновесия, а от того соотношения, в котором расходуется высвобождающаяся при фазовом превращении энергия межатомного взаимодействия на выделение теплоты и выполнение работы. Названное соотношение индивидуально для каждого из наблюдаемых фазовых превращений, причем во многих случаях не только в количественном выражении, но даже в направлении поступления энергии, необходимой для выполнения работы. Так, в низкоуглеродистой стали, например, при непрерывном отводе теплоты от образца из нее, выделение  $\delta$ -феррита из жидкости сопровождается уменьшением объема образца, а  $\alpha$ -феррита из аустенита при более низких температурах – увеличением его объема. Кроме того, подобно тому, как по одному лишь количеству отводимой от образца теплоты нельзя определить степень участия в формировании этого количества отдельно и теплоты превращения, и физической теплоты, так и по одной только регистрируемой суммарной работе сужения нельзя определить содержание в нем и работы фазового превращения, и той работы, следствием которой является изменение объема образца при понижении его температуры. Тем более, что по отношению к выделению физической теплоты работа, выполняемая при понижении температуры образца, также является результатом вторичным, вследствие чего при постоянных условиях термического действия объем образца может как уменьшаться, так и увеличиваться.

Изложенное выше свидетельствует о том, что учет только признаков выполнения работы, регистрируемых при развитии в охлаждаемом образце фазового превращения, даже в их соединении с данными об изменениях температуры, также являющихся результатом вторичным по отношению к теплоотводу, достаточную надежность результатам исследований может обеспечить лишь при определении времени начала и окончания фазовых превращений, что и наблюдается в настоящее время.

**Выводы.** Показано, что источник пониженной способности современной теории фазовых превращений к выяснению природы закономерностей их развития состоит в том, что вторичные проявления реакции материальной системы на термодинамическую силу, которая вывела ее из равновесного состояния, в соответствии с применяемым в настоящее время методическим подходом к исследованиям фазовых превращений рассматривают в качестве основной реакции системы на термодинамическую силу. Длительный опыт выполнения исследований показал, что такой подход не в состоянии обеспечить возможность выявления природы

большинства закономерностей, по которым развиваются фазовые превращения. В результате этого не могла быть установлена причинно-следственная связь между термическим действием, при котором развивается фазовое превращение и результатами этого развития.

1. *Сидоренко О.Г.* О температурных интервалах фазовых превращений при распаде аустенита / О.Г.Сидоренко //Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: Gaudeamus, 2000. – С.158–159.
2. *Гуляев А.П.* Металловедение / А.П.Гуляев // – М.: Металлургия. 1986. – 542с.
3. *Попова Л.Е., Попов А.А.* Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-растворах в сплавах титана / Л.Е.Попова, А.А.Попов // – М.: Металлургия, 1991, – 502с.
4. *Глазов В.М., Павлова Л.М.* Химическая термодинамика и фазовые равновесия / В.М.Глазов, Л.М.Павлова // М.: Металлургия, 1988, – 560с.
5. *Циглер Г.* Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды / Г.Циглер // . – М.: Мир, 1966. – 135с.

*Статья рекомендована к печати  
канд.техн.наук В.С.Лучкиным*

***О.Г.Сидоренко, О.І.Бабаченко, І.П.Федорова, А.П.Сухий***

**Про джерело зниженої здатності сучасної теорії фазових перетворень щодо з'ясування природи закономірностей їх розвитку.**

Розглянуто гіпотези щодо природи закономірностей розвитку фазових перетворень, що використовувалися для розвитку теоретичних положень. Встановлено, що відповідно до прийнятого в даний час методичними підходами при дослідженні природи закономірностей розвитку фазових перетворень враховуються тільки вторинні результати цього процесу. Достатню надійність результатам досліджень може забезпечити лише при визначенні часу початку та закінчення фазових перетворень.