

**Муравьев В.И., Фролов А.В., Дмитриев Э.А., Башков О.В., Тарасов Е.А.** ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕДПРЕВРАЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**Муравьев В. И., Фролов А. В., Дмитриев Э. А., Башков О. В., Тарасов Е. А.**  
**V.I.Muravyev, A.V.Frolov, E.A.Dmitriev, O.V.Bashkov, E.A.Tarasov**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕДПРЕВРАЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

**DEFINING THE PHASE PRETRANSFORMATION EFFICIENCY AT MANUFACTURE OF STEEL/ALLOY MATERIAL STRUCTURES USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD**

**Муравьев Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: VMuravyev@Mail.ru.

**Mr. Vassily I. Muravyev** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Welding Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: VMuravyev@Mail.ru.

**Фролов Алексей Валерьевич** – кандидат технических наук, докторант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ktsp@Knastu.ru.

**Mr. Alexsey V. Frolov** – PhD in engineering, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: Ktsp@Knastu.ru.

**Дмитриев Эдуард Анатольевич** – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационной работе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Innov@Knastu.ru.

**Mr. Eduard A. Dmitriev** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Provost for Innovation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: Innov@Knastu.ru.

**Башков Олег Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение и технологии новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Kmtnm@Knastu.ru.

**Mr. Oleg V. Bashkov** - PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: Kmtnm@Knastu.ru.

**Тарасов Евгений Александрович** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ktsp@Knastu.ru.

**Mr. Evgeniy A. Tarasov** – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: Ktsp@Knastu.ru.

**Аннотация.** Показаны возможности повышения эксплуатационных характеристик металлических изделий и эффективности технологических операций их изготовления за счёт более полного использования эффектов фазовых превращений. Представлены результаты исследований возможности использования акустико-эмиссионного метода для определения границ фазовых переходов в конструкционных сталях и сплавах.

**Summary.** There are possibilities to improve metal item performance by a more complete usage of the phase pretransformation effects. The paper demonstrates the results of a research of applying the acoustic emission method to the determination of phase transformation borders in construction steel and alloy materials.

**Ключевые слова:** термическая обработка, фазовые превращения, акустическая эмиссия, марки сталей 3сп, 5сп, 20, 45, 30ХГСА, марка сплава ВТ-20.

**Key words** heat treatment, phase pretransformations, acoustic emission, steel 3, 5, 20, 45, chromansil, VT-20.

УДК 621.78



## Введение

Как известно, значительное количество современных технологических операций изготовления металлических конструкций базируется на использовании фазовых превращений в сплавах (различные виды термической и термомеханической обработок, горячая обработка давлением, ковка и др.). Характерно, что традиционные режимы указанных технологических операций предусматривают полный перевод материала в требуемое фазовое состояние (аустенизация при закалке, горячей штамповке, прокатке и т.д.). Но в последнее время внимание исследователей и практиков всё чаще акцентируется на использовании эффектов предпревращения, то есть эффектов, происходящих на границах фазовых превращений без изменения структуры материала.

Одним из первых обнаруженных эффектов фазовых предпревращений можно считать эффект субкритической сверхпластичности [1]. Указанный эффект заключается в резком повышении пластических свойств сплава при температурах, близких к температурам фазовых превращений. Использование этого эффекта при штамповке титановых сплавов позволило повысить пластичность более чем в семь раз. Важно, что после штамповки в условиях субкритической сверхпластичности повышаются как прочностные, так и пластические механические свойства заготовки: прочность – до 10 %, пластичность – до 60 %, малоцикловая усталость – до 20 % [2].

Изотермическая закалка с выдержкой в интервале бейнитного предпревращения быстрорежущих сталей [3] обеспечивает комплексное повышение их эксплуатационных свойств, что обуславливает увеличение ресурса режущего инструмента более чем на 60 %. Аналогичные эффекты комплексного повышения эксплуатационных характеристик наблюдаются и при изотермической закалке в интервале бейнитного предпревращения стали марки 30ХГСА [4].

Эффект аустенитного предпревращения при повторной закалке [5] приводит к измельчению зерна и к комплексному повышению как прочностных, так и пластических характеристик стали 30ХГСА по сравнению с традиционной технологией её термического улучшения. Кроме того, длительность выдержки в интервале аустенитного предпревращения позволяет управлять свойствами стали в широком интервале – от свойств, характерных для отпущенного материала, до свойств закалённой стали.

Указанные эффекты связаны с ослаблением межатомных связей вблизи границы фазовых переходов. Это создаёт условия для выравнивания внутренней дефектной наноструктуры материала, устранения локальных зон с повышенной степенью плотности дислокаций, то есть устранению наклёпа, «залечиванию» трещин и т.д. Поэтому степень проявления описанных эффектов зависит от условий их термической обработки: чем ближе температурно-временные условия их изотермической выдержки к точке фазового превращения, тем в большей степени проявляются эффекты фазовых предпревращений. В то же время переход за границу фазового превращения резко уменьшает указанные эффекты.

Таким образом, эффекты фазовых предпревращений обладают значительным неиспользованным запасом потенциальных возможностей повышения эффективности технологических операций для изготовления металлических конструкций. Повышение эффективности использования фазовых предпревращений возможно за счёт максимального приближения условий изотермической выдержки сплава к границе фазового превращения, исключая само превращение. Границы фазовых переходов определяются химическим составом сплава, при этом изменение состава сплава в пределах допусков стандарта приводит к изменению положения границы фазового превращения более чем на 5 – 10 %. На положение критических точек фазовых превращений также оказывают влияние скорости нагрева и охлаждения, температура нагрева под закалку и другие факторы. Поэтому ключевым моментом решения задачи обеспечения оптимальных условий изотермической выдержки является точное определение граничных условий фазовых превращений. В идеальном варианте необходимо создать авто-

**Муравьев В.И., Фролов А.В., Дмитриев Э.А., Башков О.В., Тарасов Е.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕДПРЕВРАЩЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

материялизованную систему управления термическим циклом и контроля структуры материала непосредственно обрабатываемой детали в процессе её термической обработки.

На сегодняшний день известно достаточно большое количество методов определения структуры материала и границ его фазовых превращений. Но для поставленной задачи ни один из широко применяемых методов не подходит. Микроструктурный и дюрOMETрические методы отличаются большой трудоёмкостью, медленной скоростью и не позволяют проводить исследования в реальном времени. Магнитометрический метод не применим при температурах выше точки Кюри, а аустенитное и некоторые виды перлитного превращения протекают выше этой точки. Широко распространённый дилатометрический метод не позволяет проводить исследования на высоких скоростях нагрева и охлаждения и не позволяет исследовать процессы в непосредственно обрабатываемых деталях. В связи с этим вызывает интерес метод исследований, основанный на анализе сигналов акустической эмиссии (АЭ) [6].

Метод АЭ отличается низкой трудо- и ресурсоёмкостью, позволяет проводить исследования в реальном масштабе времени практически без ограничений по скоростям нагрева и охлаждения, а также по формам и размерам образцов. В связи с тем, что метод АЭ позволяет исследовать кинетику фазовых превращений непосредственно в обрабатываемой детали в реальном времени, он может быть эффективно использован для создания автоматической системы управления циклом термической обработки с обратной связью в виде сигналов акустической эмиссии.

В связи с вышеизложенным авторами статьи были проведены исследования влияния фазовых превращений в сталях марок 3сп, 5сп, 20, 45, 30ХГСА и сплаве марки ВТ-20 на параметры излучаемых АЭ сигналов с целью определения возможности использования метода АЭ для повышения эффективности использования фазовых превращений в технологических операциях изготовления металлических конструкций.

#### **Методика экспериментов**

Исследования проводились на пластинчатых образцах из сталей марок 3сп, 5сп, 20, 45, 30ХГСА, а также на титановом сплаве марки ВТ-20. Размеры образцов: 2 × 15 × 500 мм.

Исследуемые образцы помещались в лабораторную камерную печь SNOL-6,7/1300 на глубину 200 мм через асбестовые уплотнители шириной 40 мм. Нагрев образцов осуществлялся как вместе с нагревом печи (при исследовании скоростей нагрева менее 5 К/с), так и в предварительно разогретой до 1100 °С печи (при исследовании скоростей нагрева 50 К/с и выше).

Для исследования сигналов АЭ на холодном конце образцов размещался пьезоэлектрический приёмник акустической эмиссии GT-301. Для улучшения акустического контакта между поверхностями образца и датчика АЭ наносилась силиконовая смазка. Регистрируемые сигналы АЭ усиливались усилителем GT-200А, подвергались 12-битной аналого-цифровой обработке с частотой дискретизации 10 МГц и записывались на компьютер. После завершения эксперимента проводилась обработка полученной информации. Анализировались следующие параметры сигналов АЭ: амплитуда, длительность, энергия, мощность, спектр, а также активность АЭ.

Измерение температуры образца производилось зачеканенной в образец термопарой К-типа, сигнал с которой усиливался дифференциальным усилителем, подвергался 12-битной аналого-цифровой обработке, записывался на компьютер и синхронизировался по времени с сигналами АЭ.

Для определения критических точек фазовых переходов образцы подвергались дилатометрическому исследованию на дилатометре NETZCH DIL402PC со скоростью 10 К/мин. Полученные данные о положении критических точек фазовых превращений корректировались в соответствии с [7].

### Результаты экспериментов

Установлено, что в интервале перлитного превращения наблюдается повышение активности АЭ (см. рис. 1, 2). Важно, что вид диаграммы суммарного счёта (см. рис. 2) близок по форме к «классической» кинетической кривой превращения аустенита в перлит, что не только подтверждает связь процессов фазового превращения с регистрируемой АЭ, но и позволяет производить количественную оценку степени превращения аустенита в перлит по параметрам акустической эмиссии.

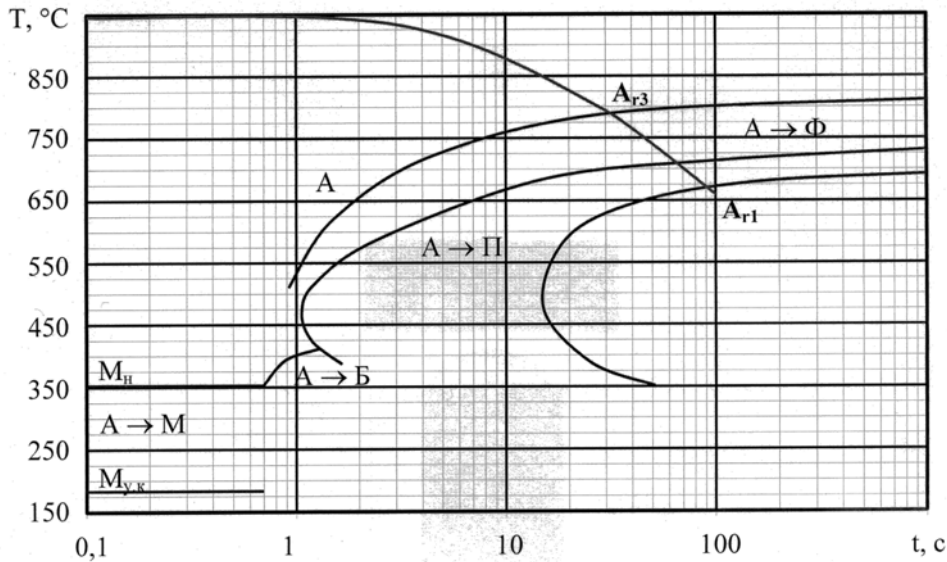


Рис. 1. Диаграмма охлаждения стали марки 5сп во время исследования влияния перлитного превращения на параметры АЭ сигналов

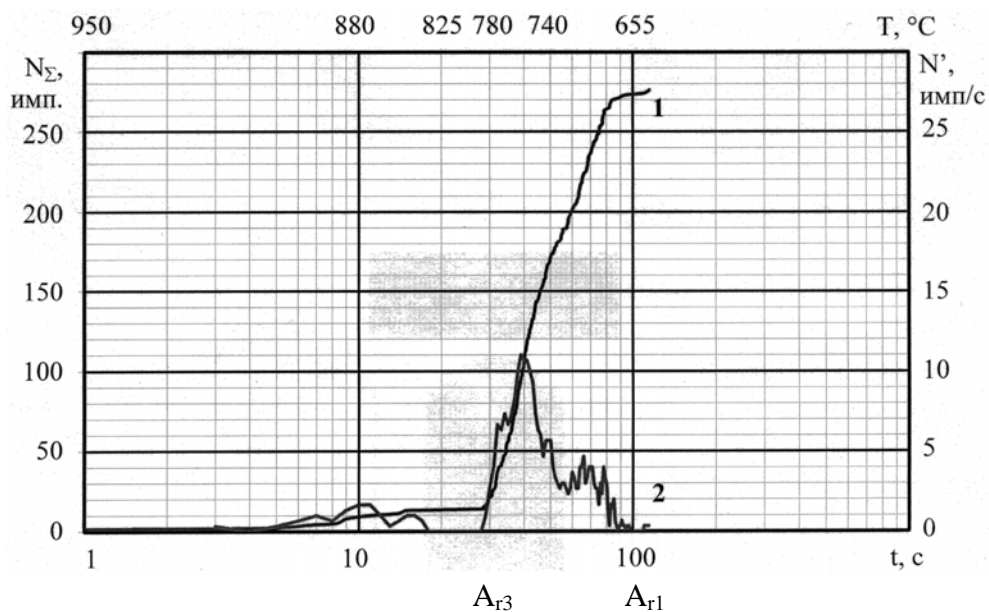


Рис. 2. Диаграммы суммарного счёта и активности АЭ во время исследования перлитного превращения в стали марки 5сп

Кроме изменения активности АЭ, завершение перлитного превращения также сопровождается изменением спектра сигналов АЭ (см. рис. 3) – в спектре практически полностью исчезают низкочастотные составляющие. Аналогичные зависимости обнаружены и для других исследованных сталей (см. рис. 4), и других скоростей охлаждения.

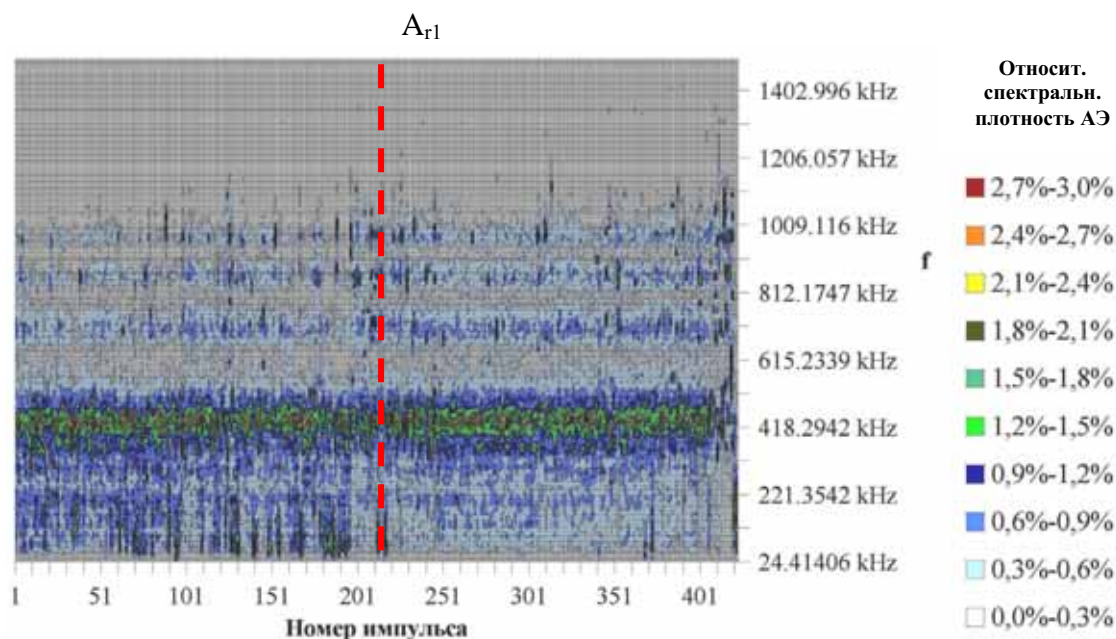


Рис. 3. Диаграмма относительной спектральной плотности АЭ сигналов во время исследования перлитного превращения в стали марки 5сп

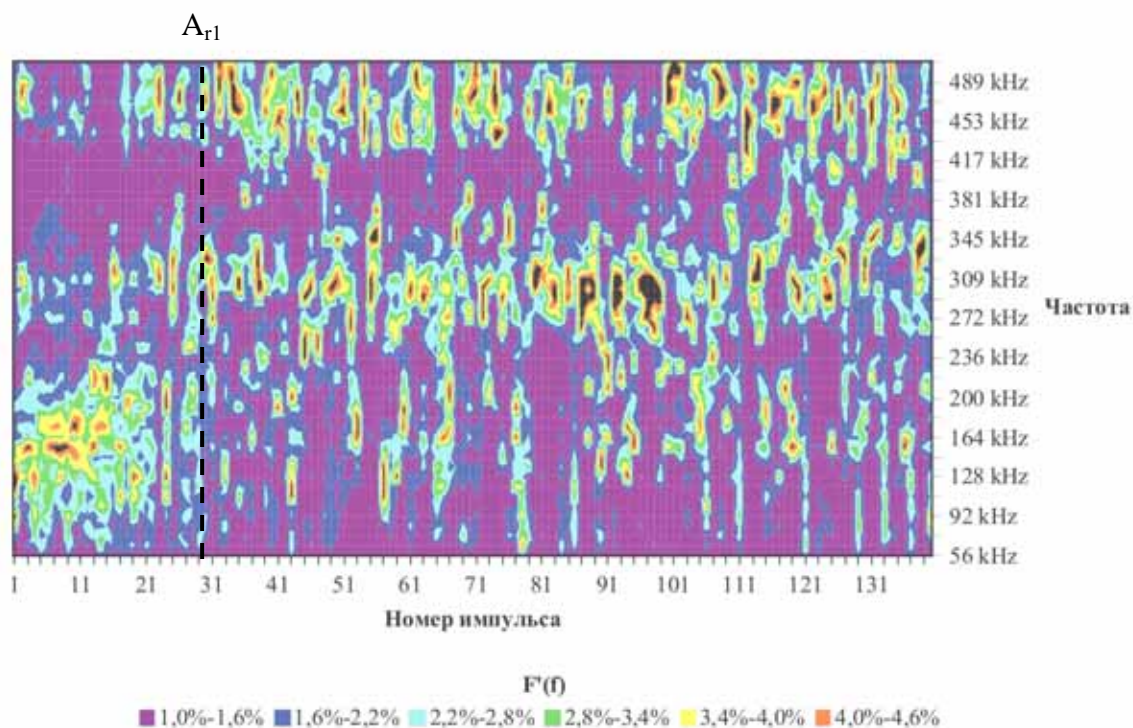


Рис. 4. Диаграмма относительной спектральной плотности сигналов АЭ при нормализации закалённой стали марки 20

Исследования аустенитного превращения (см. рис. 5 – 8) показали, что аустенитное превращение сопровождается смещением спектра АЭ в низкочастотную область. Однако на диаграмме относительной спектральной плотности процесс растворения карбидов не идентифицируется и точка  $A_{c3}$  не определяется. Относительно постоянные спектры сигналов АЭ до аустенитного превращения и после дают основание предполагать, что спектральная характеристика сигналов АЭ в значительной степени определяется типом кристаллической решётки. Важно, что на обнаруженный эффект скорость нагрева не влияет (исследованы скорости нагрева в диапазоне от 6 до 50 К/с).

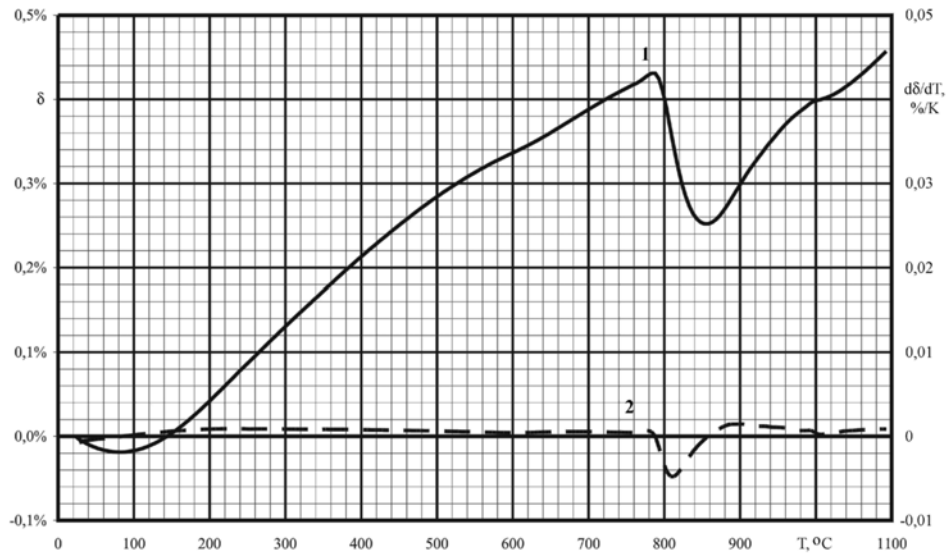


Рис. 5. Диаграммы относительного удлинения (1) и первой производной относительного удлинения (2) по температуре отожжённого образца из стали марки 30ХГСА во время его нагрева со скоростью 0,17 К/с

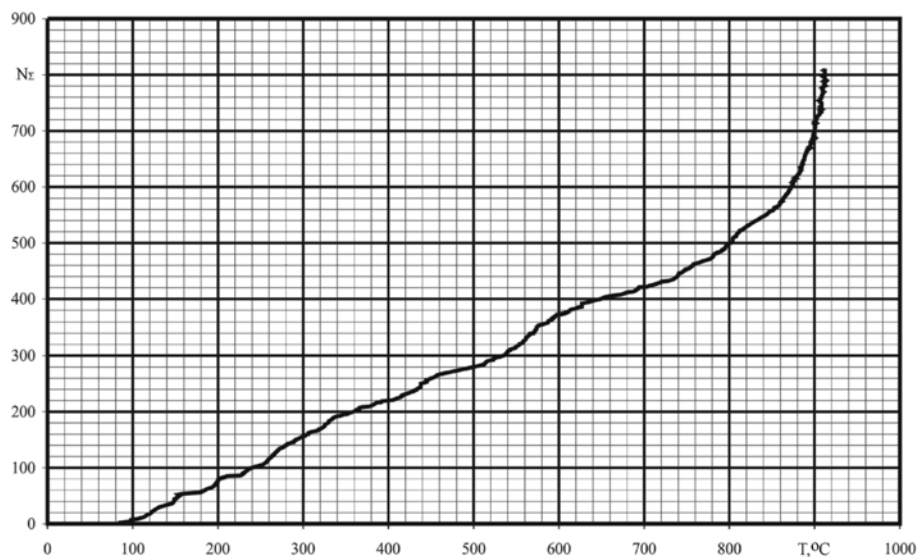


Рис. 6. Диаграмма суммарного счёта АЭ образцов из стали марки 30ХГСА при исследовании влияния аустенитного превращения

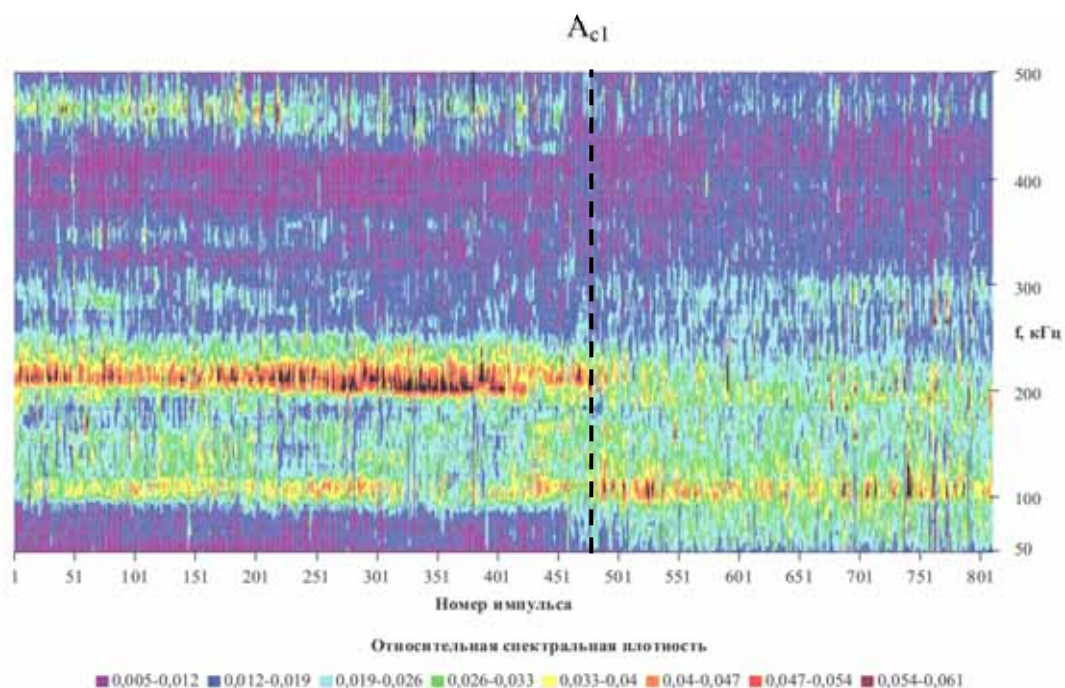


Рис. 7. Диаграмма относительной спектральной плотности сигналов АЭ при исследовании аустенитного превращения в стали марки 30ХГСА

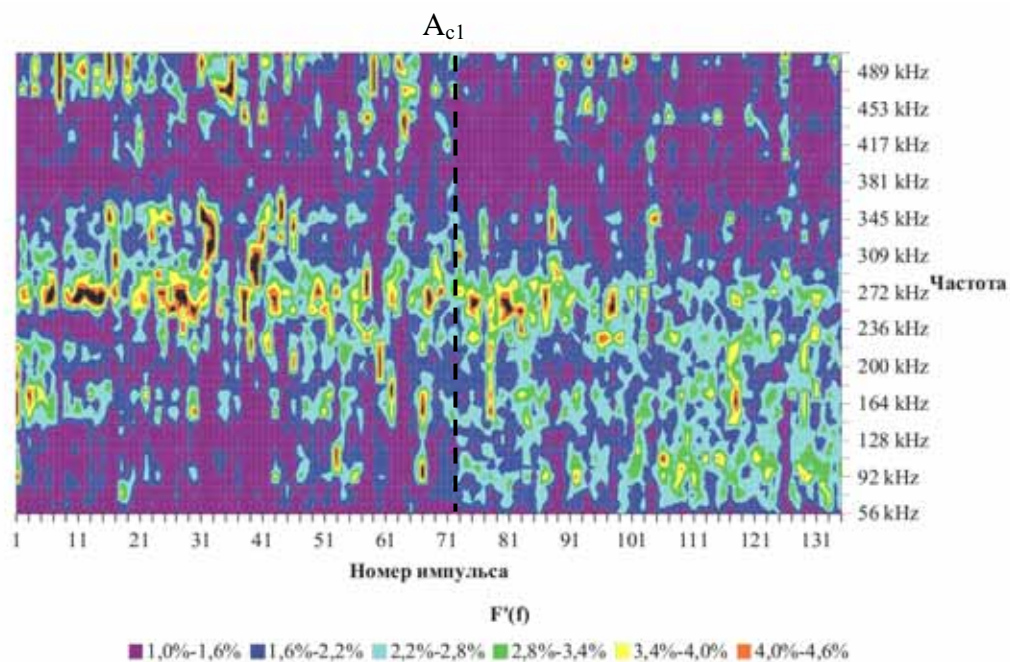


Рис. 8. Диаграмма относительной спектральной плотности сигналов АЭ во время нагрева нормализованной стали марки 20

Интересно, что спектр сигналов АЭ, излучаемых во время нагрева образцов до аустенитного превращения в значительной степени определяется не только химическим составом стали, но и структурой материала – мартенситной или перлитной (см. рис. 9 – 10). При этом у закалённого образца на спектрограмме АЭ наблюдается ещё одна характерная точка, совпадающая с областью распада остаточного аустенита (точка «А» см. рис. 9).

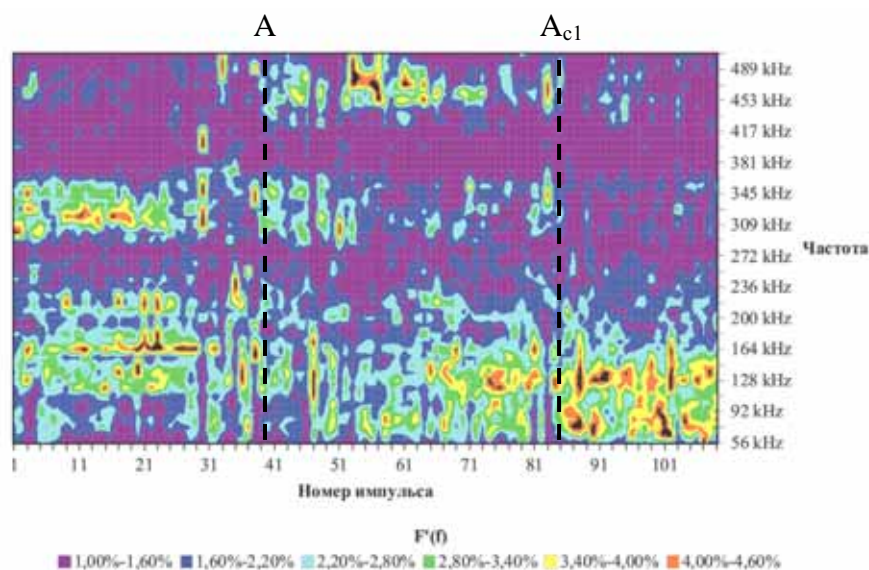


Рис. 9. Диаграмма относительной спектральной плотности сигналов АЭ при нагреве закалённой стали марки 45

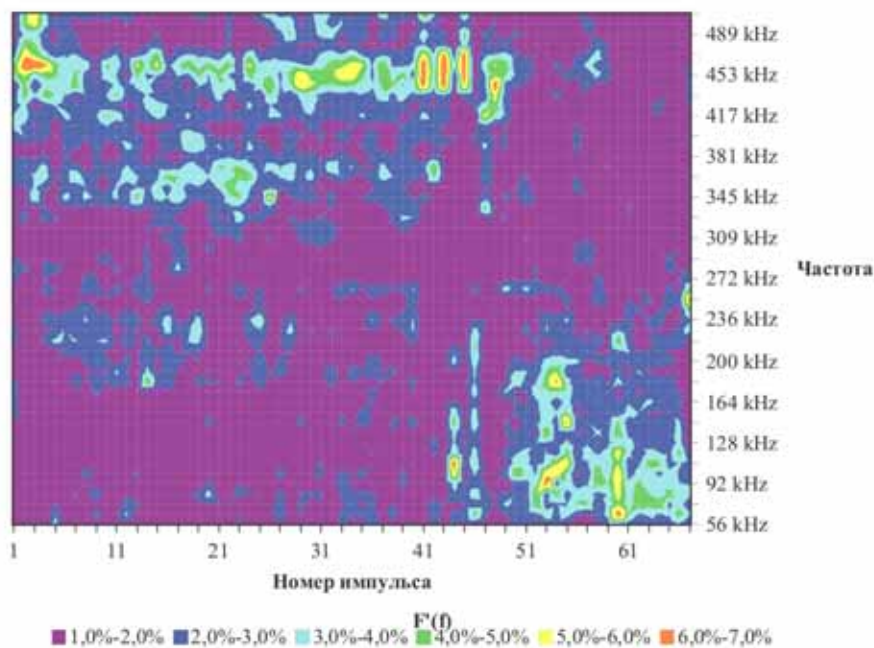


Рис. 10. Диаграмма относительной спектральной плотности сигналов АЭ при нагреве нормализованной стали марки 45

Следует заметить, что изменение спектра сигналов АЭ происходит не скачкообразно, а в некотором температурном интервале, при этом указанный интервал у закалённого образца шире. Указанные особенности могут быть объяснены неравномерным распределением температуры по объёму материала (во время нагрева), а также неравномерной структурой материала и неравномерной концентрацией в нём легирующих элементов, в результате чего аустенитное превращение начинается в локальных микрообъёмах и постепенно распространяется по всему объёму материала. Обнаруженные зависимости справедливы для всех марок исследованных сталей.



Полиморфное превращение в титановом сплаве марки ВТ-20 также влияет на параметры сигналов АЭ, снижая их активность (см. рис. 11 – 12), что, скорее всего, связано с ослаблением межзатомных связей, в результате чего снижается внутренняя энергия материала (которая раньше выделялась в виде АЭ), а сам материал становится более вязким, в результате повышается коэффициент поглощения звука и происходит демпфирование звуковых волн.

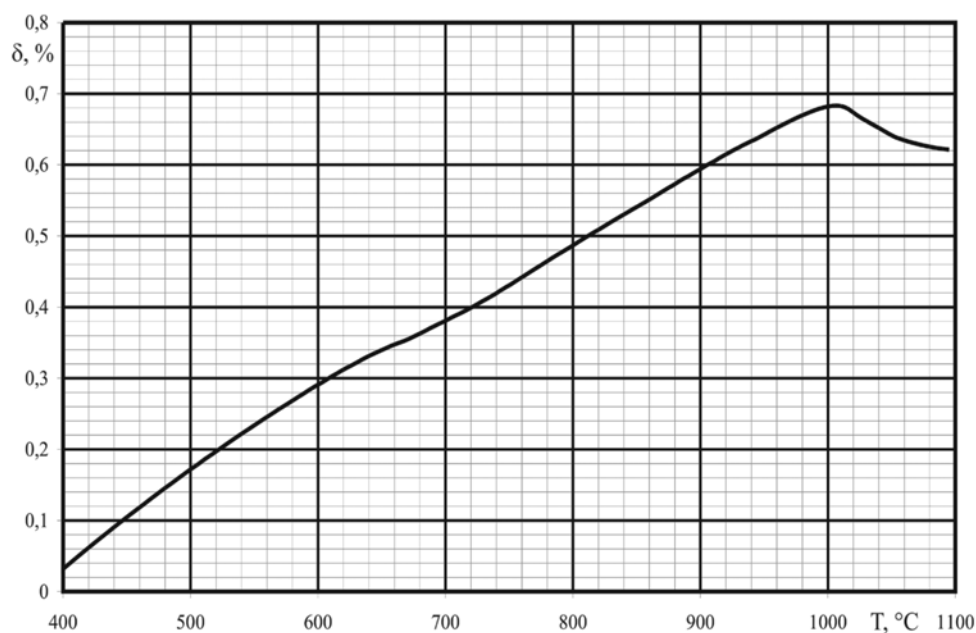


Рис. 11. Результаты дилатометрического исследования сплава ВТ-20

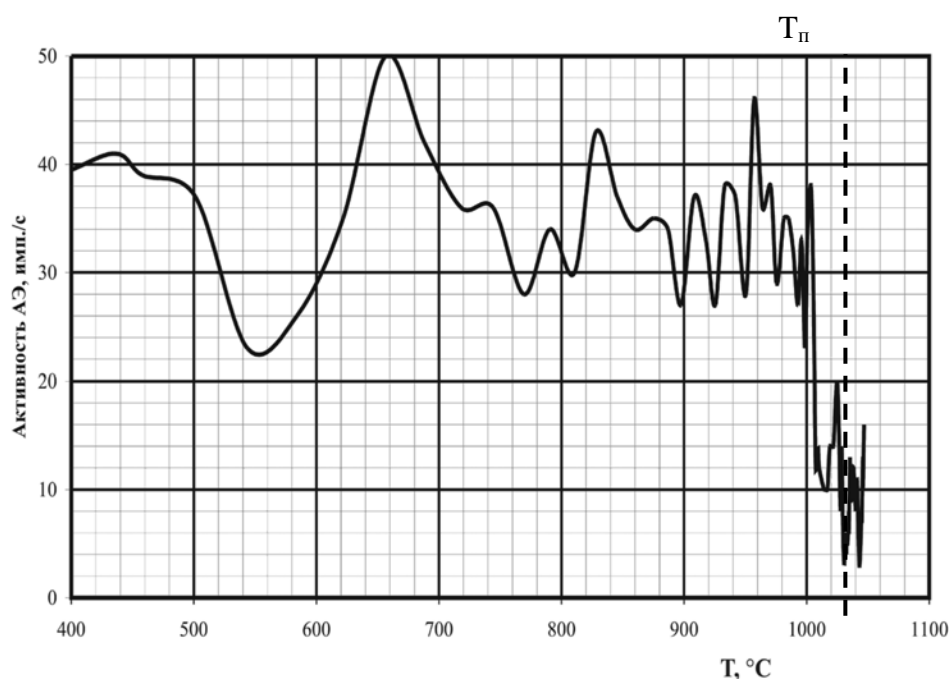


Рис. 12. Влияние полиморфного превращения в сплаве марки ВТ-20 на активность АЭ



## Основные выводы

1. Активное использование эффектов фазовых превращений является одним из перспективных направлений повышения эффективности различных технологических процессов изготовления металлических изделий. Максимальная эффективность применения фазовых превращений достигается при максимальном приближении температурно-временных условий термической обработки деталей к границе фазового перехода, исключая сам переход. Точное определение границ фазовых переходов является ключевой задачей на указанном пути повышения эффективности использования эффектов фазовых превращений.

2. Метод АЭ является перспективным методом определения критических точек фазовых превращений и исследования фазовых переходов. Данный метод позволяет быстро и дешево детектировать аустенитное, перлитное и иные полиморфные превращения непосредственно в обрабатываемой детали в реальном времени практически без ограничений по температурам, скоростям нагрева и охлаждения, что открывает большие возможности по созданию автоматизированных систем управления оптимальным циклом термической обработки сталей и сплавов.

3. Исследованные виды полиморфных превращений в значительной степени влияют на параметры сигналов АЭ. Аустенитное превращение сопровождается резким смещением спектра сигналов АЭ в низкочастотную область. Процессы распада остаточного аустенита при нагреве закалённых образцов вызывают «размытие» спектра АЭ в более широком диапазоне частот. Перлитное превращение сопровождается повышением активности АЭ и исключением из спектра сигналов АЭ низкочастотных составляющих. Кинетика излучения сигналов АЭ хорошо коррелирует с кинетикой превращения аустенита в перлит и может быть использована для количественной оценки перлитного превращения. Полиморфное превращение в титановых сплавах вызывает резкое снижение активности сигналов АЭ.

4. Характер спектра сигналов АЭ определяется структурой материала, практически не зависит от скорости термической обработки и имеет одинаковый вид для всех типов исследованных сталей.

5. Представляет значительный научный и практический интерес дальнейшее изучение влияния фазовых превращений на параметры сигналов АЭ, особенно на границе мартенситного и бейнитного превращений, а также подтверждение полученных результатов на других типах конструкционных сплавов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Муравьёв, В. И. *Обеспечение надёжности конструкций из титановых сплавов* / В. И. Муравьёв, П. В. Бахматов, Б. И. Долотов [и др.]. – М.: Эком, 2009. – 752 с.
3. Изотермическая закалка как инструмент наноформирования дефектной структуры стали P18 для улучшения эксплуатационных характеристик режущего инструмента / В. И. Муравьёв, А. В. Фролов, А. М. Злыгостев [и др.] // *Металлообработка*. – 2009. – № 2. – С. 50-57.
4. Исследование влияния фазовых превращений на субструктуру и свойства среднелегированных сталей / В. И. Муравьёв, А. В. Фролов, А. М. Мартынюк [и др.] // *Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. МНТК*. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 282-286.
5. Влияние фазовых превращений на субструктуру и свойства среднелегированных сталей / А. В. Фролов, В. И. Муравьёв, А. М. Мартынюк [и др.] // *Современное материаловедение и нанотехнологии: материалы МНТК*. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – С. 382-389.
6. Семашко, Н. А. *Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении* / Н. А. Семашко, В. И. Шпорт, В. И. Муравьёв. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
7. Зимин, Н. В. *О влиянии температуры, скорости нагрева и исходного состояния структуры углеродистых сталей на процессы образования в них аустенита* / Н. В. Зимин // *Металлообработка*. – 2006. – № 1. – С. 13-16.