

Зависимость параметров акустической эмиссии титана от температуры механических испытаний

Каюмова Э.З.^{1,†}, Астанин В.В.², Гирфанова А.А.

Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. К. Маркса 12, 450000 Уфа

[†]elvira_kayumova@rambler.ru

The dependence of the acoustic emission parameters of titanium alloy on mechanical testing temperature

E.Z. Kayumova¹, V.V. Astanin², A.A. Girfanova

Ufa State Aviation Technical University, Marx St. 12, 450000 Ufa

Изучена зависимость параметров акустической эмиссии (АЭ) титанового сплава ВТ1-0 от температуры механических испытаний, в интервале температур от 20 до 400 °С. Показано, что акустические параметры существенно зависят от механизмов деформации протекающих в процессе испытаний. Повышение температуры механических испытаний приводит к изменению механизмов деформации, что ведет к снижению амплитуды сигналов акустической эмиссии и акустической активности в целом.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, титановый сплав, механизмы деформации.

The dependence of acoustic emission parameters of titanium alloy VT1-0 from mechanical testing temperature was studied, at temperatures ranging from 20 to 400 °C. It was shown that the acoustic parameters are substantially dependent on the deformation mechanisms occurring during testing. Increasing the temperature of mechanical tests leads to a change of deformation mechanisms that leads to a decrease of the amplitude of acoustic emission signals and acoustic activity in general.

Keywords: acoustic emission, titanium alloy, deformation mechanisms.

1. Введение

Метод акустической эмиссии существенно дополняет информацию о процессах пластической деформации и разрушения материалов при испытании образцов [1-3]. Деформирование материала представляет собой сложный многостадийный процесс, который включает различные механизмы пластической деформации, зарождения и развития трещин. Каждая стадия характеризуется определенными параметрами сигналов акустической эмиссии (АЭ), анализируя которые, можно получить информацию о происходящих в материале процессах. Механизмы деформации и разрушения меняются с изменением температуры, что можно проследить, сопоставляя характер акустических сигналов со структурными изменениями, происходящими в результате деформации.

2. Материал и методика исследований

Образцы технического титана ВТ1-0 были вырезаны на проволочном электроискровом станке из листов толщиной 1 мм. Длина рабочей части и площадь сечения образцов равны 25 мм и 4 мм²

соответственно. Испытания образцов на одноосное растяжение проводили при температурах 20...400 °С на электромеханической машине INSTRON 8862 со скоростью перемещения захвата 1 мм/мин. Диаграммы растяжения построены в координатах напряжение – время для удобства сопоставления с синхронной записью сигналов АЭ. Характеристики пластичности образцов при различных температурах испытаний приведены в отдельной таблице.

Регистрация сигналов АЭ проводилась лабораторным программно-аппаратным комплексом «Малахит АС-12А». Был использован преобразователь резонансного типа ДР 15И. Собственные шумы машины и аппаратуры не превышали установленного порога чувствительности 25 дБ. Преобразователь устанавливали на специальной струбине, закрепленной на верхней тяге машины, одновременно служившей волноводом. Сигналы АЭ анализировали по амплитуде, энергии, продолжительности и частоте событий, но для лаконичного представления в настоящей статье вычисляли обобщенный параметр как произведение среднего значения амплитуды сигналов на число событий за короткие промежутки времени ($t=5$ секунд).

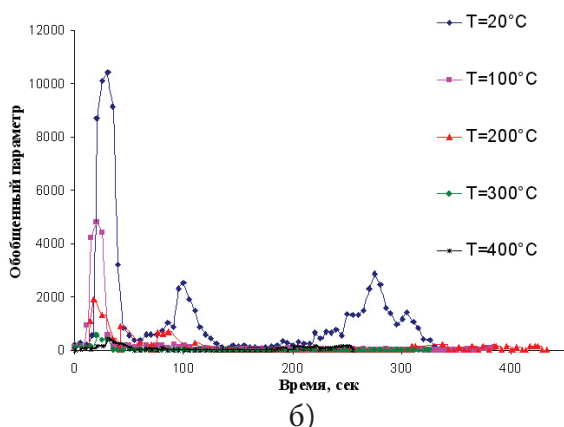
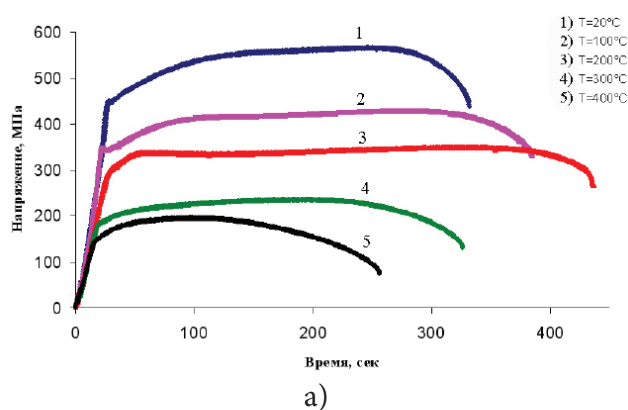


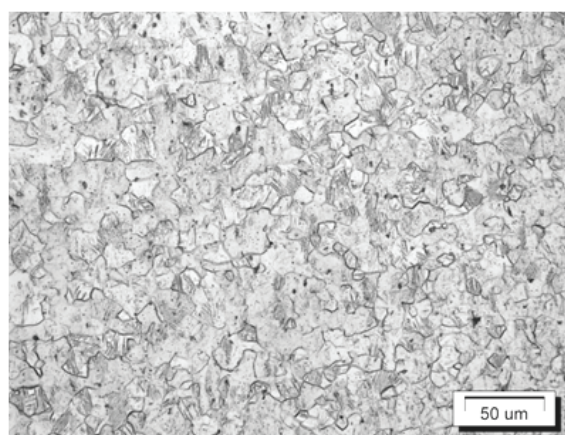
Рис.1. Диаграммы растяжения титана VT1-0 (а) и зависимости обобщенного параметра АЭ от времени механических испытаний (б) при различных температурах.

По нашему мнению, полученные зависимости наиболее наглядно отражают различия в деформационном поведении образцов.

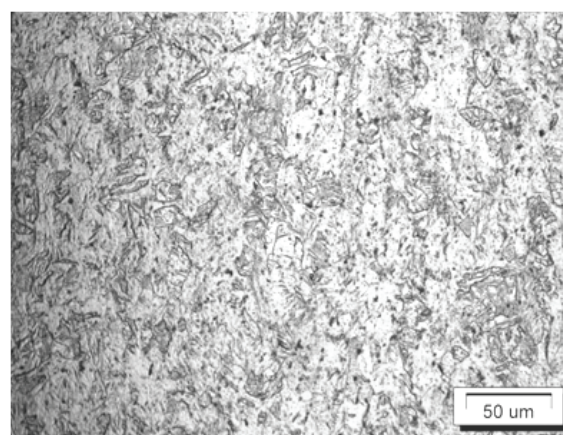
Для исследования микроструктуры из исходных и деформированных при различных температурах образцов изготавливали микрошлифы. Микроструктура изучалась на оптическом микроскопе OLYMPUS GX 51. Поверхности излома образцов исследованы с помощью растрового электронного микроскопа JSM – 6390 (Работа выполнена с использованием оборудования НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии» ФГБОУ ВПО «УГАТУ».).

3. Результаты исследования

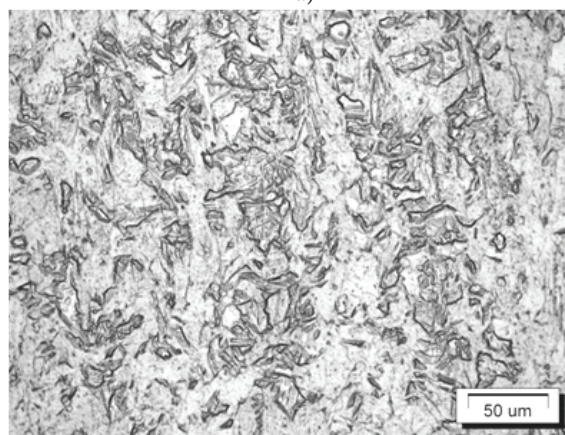
На рис. 1, а приведены диаграммы растяжения образцов титана VT1-0 в координатах напряжение – время. Поскольку использована одна скорость деформации, то продолжительность диаграммы по времени вполне адекватна степени деформации. Здесь можно отметить следующие тенденции. С повышением температуры испытаний деформация, как обычно, проходит при более низких напряжениях, но удлинение до разрушения с повышением температуры изменяется немонотонно. При повышении температуры испытаний до 200°C пластичность увеличивается, а по достижении 300 и 400°C уменьшается. Постепенно меняется характер кривых. При низких температурах (20...200°C) наблюдается длительная стадия однородного течения,



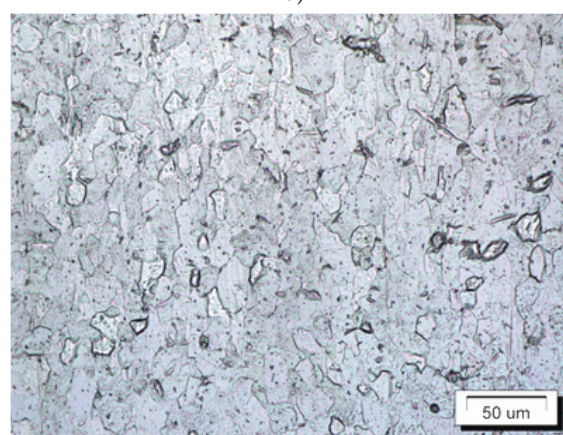
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Микроструктура титана VT1-0: а – исходное состояние; после механических испытаний при температуре б – 20 °C; в – 200 °C; г – 400 °C.

протяженность которой увеличивается с повышением температуры. Напряжения достигают максимального значения в конце деформации перед началом разрушения. При повышенных температурах продолжительность стадии однородного течения сокращается, максимальные напряжения наблюдаются на малых степенях деформации.

Зависимость обобщенного параметра АЭ от времени механических испытаний представлена на рис. 1, б. Во всех случаях можно видеть, что интенсивные сигналы АЭ появляются уже на ранней стадии деформации образцов.

При комнатной температуре наибольшая акустическая активность наблюдается на начальной стадии деформации и быстро снижается на стадии интенсивного упрочнения (рис. 1, а). Второй менее выраженный пик активности АЭ возникает при переходе от стадии интенсивного упрочнения к стадии стационарного течения. Третий пик соответствует достижению предела прочности и началу стадии падения нагрузки.

Повышение температуры испытаний приводит к снижению амплитуды сигналов акустической эмиссии и акустической активности в целом. Акустическая активность на начальной стадии деформации при температурах 100 и 200 °С снижается, хотя и остается заметной. На стадии однородного течения при температурах 100 и 200 °С активность сигналов АЭ очень низкая, а при температурах 300 ... 400 °С сигналы вообще не наблюдаются. Снижение нагрузки перед разрушением при повышенных температурах не сопровождается значительным возрастанием акустической активности.

Происхождение сигналов АЭ можно определить изучением структуры деформированных образцов и поверхностей разрушения.

Микроструктура образцов в исходном состоянии однородная со средним размером зерен порядка 20 мкм (рис. 2, а). В ряде зерен присутствуют линзовидные двойники, пересекающие зерна от границы до границы. В металлах с ГП решеткой двойники возникают при нагреве и охлаждении вследствие анизотропии теплового расширения [5]. Количество таких зерен не превышает 25 % общего числа. После растяжения при температуре 20 °С (рис. 2, б) зерна приобрели вытянутость, адекватную степени деформации образца, существенно возросло количество двойников. Наряду с крупными двойниками появилось большое количество мелких, заполняющих свободные участки зерен. Повышение температуры

испытаний до 200 °С (рис. 2, в) приводит к снижению числа двойников, особенно мелких. При 400 °С (рис. 2, г) образование двойников прекращается. Выявление четкой количественной корреляции между суммарной протяженностью двойниковых границ и сигналами АЭ в условиях проведенного эксперимента, не представляется возможным, так как на параметры акустических сигналов влияет не протяженность границ, а относительный объем образующихся двойников, определить который металлографически достаточно трудно.

В отличие от относительного удлинения до разрушения (таблица 1), относительное сужение образцов монотонно увеличивается с повышением температуры, что свидетельствует об усилении склонности к локализации пластического течения и повышении вязкости материала.

О повышении вязкости материала говорит и изменение рельефа на поверхности излома образцов (рис. 3). При всех температурах испытаний излом имеет вид вязкого отрыва и состоит из относительно округлых ямок различных размеров. При температурах 20 и 100 °С заметны сколы, идущие от поверхности образца (рис. 3, а, б); многие ямки объединены в фасетки, отражающие групповой характер разрушения. При более высоких температурах (рис. 3, в, г) эта тенденция становится незаметной.

Совместный анализ диаграмм деформации, сигналов АЭ и структурных изменений позволил представить объективную картину происходящих процессов. Акустическая эмиссия на развитой стадии деформации часто связывается с активным дислокационным скольжением. В нашем эксперименте установленный порог чувствительности (25 дБ) и частотные характеристики преобразователя не позволяют регистрировать дислокационную активность. Наблюдаемые сигналы обусловлены процессами двойникования, что подтверждено металлографическими исследованиями (рис. 2) и отмечается в работах других авторов, выполненных на том же материале [4].

При температуре испытаний 20 °С на начальной стадии деформации в материале образуются крупные линзовидные двойники, полностью пересекающие зерна. Это происходит в зернах, особым образом ориентированных относительно действующих напряжений. Количество таких двойников ограничено и вызванная ими акустическая активность быстро затухает (рис. 1, б). Двойникование сменяется конкурирующим с ним дислокационным скольжением, что сопровождается интенсивным упрочнением. Повышение напряжений приводит к новой активизации двойникования с образованием более мелких двойников, которые заполняют оставшиеся свободными участки зерен. Именно этим обусловлено появление второго пика акустической активности. Амплитуда сигналов в этом случае была существенно ниже, но частота событий оставалась высокой. Второй пик наблюдается и на кривой при температуре 100 °С, но при меньшей амплитуде, он более растянут по времени, что возможно связано с индивидуальными особенностями образца. По мере заполнения зерен мелкими двойниками активность

Таблица 1.

Характеристики пластичности образцов при различных температурах испытаний.

Температура, °С	Удлинение, %	Относительное сужение, %
20	21	45
100	26	49
200	32	55
300	27	64
400	16	69

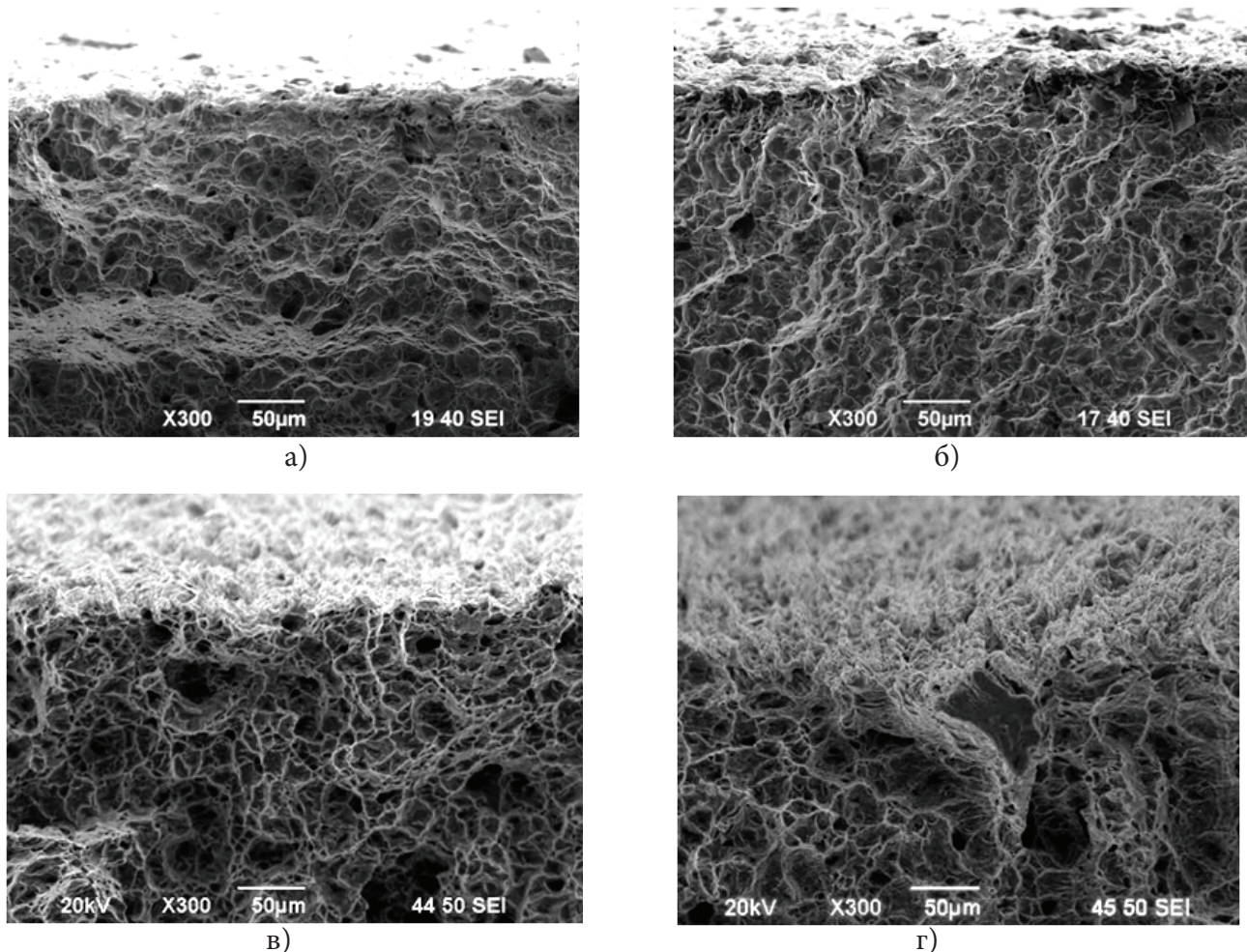


Рис. 3. Поверхности излома образцов при различных температурах испытаний: а –20 °С; б – 100 °С; в – 200 °С; г – 400 °С.

сигналов АЭ постепенно снижается и снова возрастает доля дислокационного скольжения.

Третий этап активности АЭ, приходящийся на стадию максимальных напряжений, по всей видимости, связан с началом образования микротрещин. Раннему образованию микротрещин может способствовать наличие двойников, обычно связанных с концентрацией напряжений [5]. Активность сигналов постепенно нарастает, достигая максимума к началу стадии разупрочнения. Ослабление акустической активности по мере снижения напряжений может быть истолковано уменьшением числа и размера зарождающихся трещин. Уже в самом конце стадии разрушения прострел магистральных трещин отмечается несколькими сигналами с очень высокой амплитудой. При температуре 100 °С, кривая активности АЭ выглядит более сглажено, чем при 20°С, тем не менее, обобщенный параметр возрастает от 20 до 100 единиц обобщенного параметра (показано на увеличенной вставке на рисунке 1, б), при более высоких температурах этот пик исчезает полностью.

С повышением температуры снижаются критические напряжения сдвига различных систем, и двойникование все больше уступает место скольжению. Именно этим можно объяснить повышение пластичности при температурах 100 и 200 °С. Число двойников в струк-

туре уменьшается, следовательно, снижается и акустическая активность. Уменьшение амплитуды сигналов АЭ дополнительно связано со снижением напряжений деформации. Дальнейшее повышение температуры до 400 °С приводит к тому, что пластическая деформация скольжением становится преобладающим процессом. И, так как наше оборудование не позволяет регистрировать скольжение, акустическая активность на стадии однородного течения не наблюдается.

Возрастание амплитуды сигналов АЭ при температуре 20 °С перед разрушением связывается с образованием трещин в материале. Энергия упругой деформации, высвобождаемая при раскрытии трещины, и, создающая упругую акустическую волну, пропорциональна квадрату приложенного напряжения [5] (Для наглядности использована простая формула для плоского напряженного состояния):

С повышением температуры процесс разрушения сопровождается уменьшением активности высокоамплитудных сигналов, которую можно связать с уменьшением деформирующихся объемов в образце (из-за образования шейки и раскрытия пор), которые излучают импульсы. Известно, что уменьшение объема материала, излучающего АЭ, приводит к снижению общего количества регистрируемых импульсов АЭ, а так же к уменьшению источников генерации импульсов высокой амплитуды, которых в процессе деформирования обра-

$$U_E = -\frac{\pi c^2 \sigma^2}{E}$$

зается недостаточно и к концу испытания они просто исчерпываются [6].

Таким образом, изменение температуры деформирования до 400 °С приводит к заметным изменениям в механизме деформации титана при его растяжении. Совместный анализ диаграмм растяжения, сигналов АЭ и изменений структуры позволил рассмотреть阶段性ность процесса деформации и разрушения титана. Обнаруженные различия в деформационном поведении образцов титана, в зависимостях акустической активности, в соотношении высоко- и низкоамплитудных сигналов в спектре регистрируемых сигналов АЭ при растяжении связаны со степенью локализации пластической деформации, которая реализуется в материале.

Выводы

1. С повышением температуры испытаний сплава VT1-0 снижается участие двойникования и меняется характер дислокационного скольжения. Эти изменения отражаются в характеристиках пластичности, сигналов АЭ и структурных изменениях. Повышение температуры испытаний приводит к снижению амплитуды сигналов акустической эмиссии на стадии пластического течения и акустической активности в целом.

2. Уменьшением влияния двойникования и усилением роли дислокационного скольжения можно объяснить повышение пластичности при температурах 100 и 200 °С. При более высоких температурах сокращается продолжительность стадии однородного течения и усиливается склонность к локализации деформации и раннему формированию шейки. Максимальные напряжения наблюдаются на малых степенях деформации. Деформационное упрочнение недостаточно для стабилизации течения.

3. Начальная стадия разрушения образцов надежно регистрируется акустико-эмиссионным комплексом «Малахит АС-12А» при температурах до 200 °С. С повышением температуры активность сигналов от микротрещин снижается, что связано со снижением напряжений и повышением вязкости разрушения. Последнее следует из монотонного увеличения

относительного сужения образцов с повышением температуры и изменения характера излома.

Литература

1. N. Bunina. The study of plastic deformation of metals by the method of acoustic emission. Leningrad: Publishing House of the University of Leningrad, (1990) 155 p. (in Russian) [Н.А. Бунина. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии. Л.: Изд-во Ленинградского университета, (1990), 155 с.].
2. Non-destructive testing. In the 5 books. Ed. V.V.Suhorukova. - М.: High. wk. (1992) (in Russian) [Не разрушающий контроль. В 5 кн. Под ред. В.В.Сухорукова. - М.: Высш. шк. (1992)].
3. P. Stoev, I. Papirov. Acoustic emission during deformation of titanium // Problems of Atomic Science and Technology. 4, 184 (2007). (in Russian) [П.И. Стоев, И.И. Папилов. Акустическая эмиссия титана в процессе деформации // Вопросы атомной науки и техники. 4, 184 (2007)].
4. N. Lopatin, G. Dyakonov, S. Zhrebtsov, G. Salishev. Structure and mechanical properties of a nanostructured titanium sheet VT1-0 produced by cold rolling // Scientific Statement. 11(82) Iss. 19, 69 (2010) (in Russian) [Н.В.Лопатин, Г.С.Дьяконов, С.В.Жеребцов, Г.А.Салищев. Структура и механические свойства наноструктурного листа из титана VT1-0, полученного холодной прокаткой // Научные ведомости 11(82) Вып.19, 69 (2010)].
5. R. Honeycombe. Plastic deformation of metals. Springer-Verlag (1972), 408 p (in Russian) [Р. Хоникомб. Пластическая деформация металлов. М.: Мир (1972), 408 с].
6. P. Stoev, I. Papirov. Effect of heat treatment conditions on acoustic emission titanium sheet // Problems of Atomic Science and Technology. (4), 119(2007). (in Russian) [П.И. Стоев, И.И. Папилов. Влияние условий термической обработки на акустическую эмиссию листового титана // Вопросы атомной науки и техники. (4), 119(2007)].