



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
C22F 1/047 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2016124884, 21.06.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
21.06.2016

Дата регистрации:  
23.07.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 21.06.2016

(45) Опубликовано: 23.07.2018 Бюл. № 21

Адрес для переписки:

656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, ФГБОУ ВО  
"Алтайский государственный университет",  
отдел охраны интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Макаров Сергей Викторович (RU),  
Плотников Владимир Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Алтайский государственный  
университет" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2310526 C2, 20.11.2007. SU  
1532596 A1, 30.12.1989. US 20070068605 A1,  
29.03.2007. RU 2529327 C2, 27.09.2014.

(54) Способ пластической деформации алюминия и его сплавов

(57) Реферат:

Изобретение относится к области пластической обработки металлов и может быть использовано в различных областях промышленности и науки для пластической деформации алюминия и сплавов из алюминия. Способ пластической деформации алюминия и его сплавов включает механическое нагружение деформируемого объема образца-резонатора при температурном и ультразвуковом воздействии, причем механическое нагружение осуществляют при напряжении 90-200 МПа в интервале температур 450-250°C, при этом в процессе нагружения измеряют колебательную энергию

акустической эмиссии и при достижении ею значений не ниже  $15 \cdot 10^{-12}$  В<sup>2</sup>с, соответствующих деформационному структурному переходу, осуществляют ультразвуковое воздействие с частотой, выбираемой из низкочастотного диапазона 20-90 кГц и определяемой геометрией деформируемого объема образца-резонатора. Изобретение направлено на повышение ресурса пластичности алюминия и его сплавов в условиях одновременного воздействия механического напряжения, температуры и ультразвуковых колебаний. 5 пр., 1 табл., 7 ил.

RU 2 661 980 С1

RU 2 661 980 С1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*C22F 1/047* (2006.01)

(21)(22) Application: **2016124884, 21.06.2016**

(24) Effective date for property rights:  
**21.06.2016**

Registration date:  
**23.07.2018**

Priority:

(22) Date of filing: **21.06.2016**

(45) Date of publication: **23.07.2018** Bull. № 21

Mail address:

**656049, g. Barnaul, pr. Lenina, 61, FGBOU VO  
"Altajskij gosudarstvennyj universitet", otdel  
okhrany intellektualnoj sobstvennosti**

(72) Inventor(s):

**Makarov Sergej Viktorovich (RU),  
Plotnikov Vladimir Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniya "Altajskij gosudarstvennyj  
universitet" (RU)**

(54) **METHOD OF PLASTIC DEFORMATION OF ALUMINUM AND ALUMINUM ALLOYS**

(57) Abstract:

FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: invention relates to plastic processing of metals and can be used in various fields of industry and science for the plastic deformation of aluminum and aluminum alloys. Method of plastic deformation of aluminum and its alloys includes mechanical loading of the deformable volume of the resonator sample under temperature and ultrasonic influence, and mechanical loading is carried out at a voltage of 90–200 MPa in the temperature range 450–250 °C, while in the process of loading, the vibrational energy of the acoustic emission and when

it reaches values no lower than  $15 \cdot 10^{-12} \text{ V}^2\text{s}$ , corresponding to the deformation structural transition, ultrasonic action is performed with a frequency selected from the low-frequency range of 20–90 kHz and determined by the geometry of the deformable volume of the resonator sample.

EFFECT: invention is aimed at increasing the plasticity resource of aluminum and its alloys under conditions of simultaneous exposure to mechanical stress, temperature and ultrasonic vibrations.

1 cl, 5 ex, 1 tbl, 7 dwg

Изобретение относится к области пластической обработки металлов может быть использовано в различных областях промышленности и науки для пластического формоизменения алюминия и его сплавов.

Известен акустопластический эффект [Blaha, B. Langenecke // Naturwiss. Rundsch - 1955. - 42 - Н.20- S. 556.], заключающийся в повышении пластичности материалов под действием ультразвука, экспериментально обнаруженный на ультразвуковых частотах Блаха и Ланженекером [1] и представляющий собой скачкообразное снижение напряжения однонаправленной деформации кристалла при наложении на него знакопеременных деформаций.

Акустопластический эффект наблюдается в широком диапазоне частот от единиц герц до мегагерц, но наиболее широкое применение он нашел в диапазоне 15-40 кГц. Акустопластический эффект, реализуемый при одновременном воздействии ультразвука и статического нагружения, есть результат суммирования статических напряжений и динамических напряжений ультразвуковой волны.

При размещении образца в узле стоячей волны увеличивается скорость ползучести в меди при воздействии продольной стоячей волной частотой 20 кГц. Эффект наблюдают в пучности, сформированной в образце стоячей волны. В технологических процессах при прокатке амплитуда динамических напряжений лежит в диапазоне  $10^7$ - $10^8$  Па. Ввод ультразвука в образец для формирования стоячей волны осуществляется через волновод в виде концентратора ультразвука, объединенного с ультразвуковым преобразователем. При одновременном воздействии ультразвуковых колебаний частотой 20 кГц и статических нагрузок в медном образце существенно возрастает плотность вакансий ( $10^{20}$  вакансий/с при амплитуде колебаний 1 мкм). При длительном воздействии ультразвука наблюдается разрушение образцов, обусловленное интенсивным порообразованием по границам зерен.

Недостатки: эффект охрупчивания и разрушения как негативное проявление длительного ультразвукового воздействия на деформируемый материал и фактически ограничивает использование ультразвука на практике.

Известен способ пластической деформации металлов и устройство для его осуществления [Делюсто Лев Георгиевич. Патент РФ №2310526 от 20.11.2007] - прототип. Способ включает обработку деформируемого металла в ходе прокатки ультразвуком частотой до 5 МГц и магнитным полем с индукцией 70 Тл. Повышение пластичности деформируемого металла происходит за счет снижения количества дефектов в металле в ходе непрерывного ультразвукового и магнитного воздействия, причем источником магнитного поля могут быть использованы электромагниты или постоянные магниты. В соответствии с прототипом повышение пластичности есть результат снижения дефектов структуры деформируемого прокаткой металла, что противоречит физике пластичности материалов, согласно которой пластическое поведение металлов осуществляется как раз за счет скольжения дислокаций - линейных дефектов кристаллической решетки.

Недостатки: способ пластического деформирования не повышает пластичность деформируемого металла.

Задача изобретения - повышение ресурса пластичности металла в условиях одновременного воздействия механического напряжения, температуры и ультразвуковых колебаний при пластическом деформировании алюминия и его сплавов.

Сущность изобретения.

Способ пластической деформации алюминия и его сплавов в условиях механического нагружения, воздействия температуры и ультразвукового воздействия заключается в

том, что ультразвуковое воздействие осуществляют на частоте ультразвуковых колебаний из низкочастотного диапазона 20-90 кГц, отвечающей основным резонансам, определяемых геометрией образца-резонатора, то есть геометрией деформируемого объема металла или сплава, при достижении критических параметров температурно-силового воздействия, характеризующихся механическим напряжением 90-200 МПа, температурой в интервале 450-250°C, колебательной энергией акустической эмиссии не ниже  $15 \cdot 10^{-12} \text{ В}^2\text{с}$ , соответствующим деформационному структурному переходу в деформируемом материале.

Поставленная задача достигается тем, что в ходе совместного воздействия на металл или сплав механического нагружения и температуры ультразвуковое воздействие осуществляется лишь после деформационного структурного перехода. Деформационный структурный переход фиксируется по моменту времени значительного (в 4-5 раз) увеличения скорости накопления деформации в деформируемом материале, которому в соответствие ставится механическое напряжение и достигнутая температура. К этому моменту в деформируемом объеме запасается критический уровень колебательной энергии внутреннего акустического поля стоячих акустических волн величиной не ниже  $15 \cdot 10^{-12} \text{ В}^2\text{с}$ , сформированных из первичных сигналов акустической эмиссии. Этому моменту времени соответствует начало внешнего ультразвукового воздействия на частоте ультразвуковых колебаний, соответствующих основным низкочастотным резонансам в интервале частот 20-90 кГц, определяемых геометрией образца-резонатора.

Способ реализуется следующим образом

1. Подготовленные образцы из алюминий-магниевого сплава размещают в установку для высокотемпературного механического и ультразвукового воздействия.

2. Образцы нагружают механическим напряжением в интервале 90-200 МПа и нагревают до температуры в интервале 450-250°C (для напряжения 90 МПа температура не ниже 450°C, для напряжения 200 МПа температура не ниже 250°C), регистрируя прирост деформации и акустическую эмиссию.

3. В момент деформационного структурного перехода, когда колебательная энергия акустической эмиссии не ниже  $15 \cdot 10^{-12} \text{ В}^2\text{с}$ , осуществляется ввод в деформируемый образец ультразвуковых колебаний на частоте основных резонансов из низкочастотного диапазона от 20 до 90 кГц.

4. Ультразвуковые колебания вводятся в деформируемый образец с помощью волновода, объединенного с концентратором ультразвука магнитострикционного преобразователя.

Воздействие ультразвуком на частоте основных резонансов деформируемого объема в низкочастотном диапазоне 20-90 кГц в момент естественного высокопластичного структурного состояния деформируемого материала, подготовленного совместным действием механического напряжения в интервале 90-200 МПа, температуры в интервале **450 – 250 °С** и колебательной энергией акустической эмиссии не ниже  $15 \cdot 10^{-12} \text{ В}^2\text{с}$ , увеличивает ресурс аномальной пластичности деформируемого металла.

Примеры конкретного исполнения

Пример 1

Металлический образец из алюминия или алюминий-магниевого сплава АМгб, в виде стержня 1, соединенный с волноводом акустической эмиссии помещают в устройство для термического и механического воздействия, фиг. 1. Образец 1 закрепляют в неподвижном захвате 2, нагружают механической нагрузкой в интервале 40-200 МПа с помощью подвижного захвата 3, нагревают элементом 4 до 550°C и измеряют прирост

деформации с помощью измерителя деформации, совмещенного с подвижным захватом 3. При одновременном воздействии механического нагружения и нагрева образца 1 происходит пластическое деформирование металла, сопровождающееся акустической эмиссией. Данные об акустической эмиссии в виде электрических сигналов, полученные с помощью пьезопреобразователя 5, по каналу I поступают на аналогоцифровой преобразователь 6 и компьютер 7. По каналам II, III соответственно поступают данные о температуре и деформации также на аналогоцифровой преобразователь 6 и компьютер 7 для обработки и анализа данных.

С помощью установки (фиг. 1) провели деформирование образцов алюминиево-магниевого сплава в интервале нагрузок 40-200 МПа и нагреве от комнатной температуры до 550°C. Как показано на фиг. 2 при нагрузке 120 МПа характер накопления деформации представляет собой монотонный (область I) и квазискачкообразный (область II), монотонному характеру накопления деформации соответствует монотонное возрастание среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии, квазискачкообразному характеру отвечает резкое возрастание среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии. Резкое возрастание среднеквадратичного напряжения свидетельствует о существенном увеличении колебательной энергии акустической эмиссии в деформируемом объеме образца.

Установлено, что переход из области I в область II, характеризующийся существенным (в 4-5 раз) возрастанием скорости накопления деформации, представляет собой деформационный структурный переход. Деформационному структурному переходу отвечают критические значения параметров термомеханического воздействия: механического напряжения в интервале 90 - 200 МПа, температуры в интервале 450-250°C, колебательной энергии акустической эмиссии не ниже  $15 \cdot 10^{-12} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$ .

#### Пример 2

Проведем анализ спектра акустических сигналов, полученных в примере 1, в виде временных зависимостей среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии. Анализ спектра проводят методом быстрого преобразования Фурье. На фиг. 3 приведено распределение спектральной плотности сигналов акустической эмиссии в диапазоне от 10 кГц до 700 кГц, зарегистрированного в ходе деформации образца алюминия.

Из приведенных данных следует, что энергия сигналов акустической эмиссии распределена в двух частотных диапазонах: в высокочастотном от 100 кГц и до 700 кГц спектральная плотность мала и распределена около частот 600, 350 и 150 кГц; в низкочастотном в интервале от 10 кГц и до 100 кГц колебательная энергия существенно выше, чем в высокочастотном диапазоне. Диапазон частот 100-700 кГц характеризует спектр первичных сигналов акустической эмиссии. Низкочастотный диапазон частот 10-100 кГц представляет собой совокупность острых (фактически резонансных) пиков, сформированных за счет перераспределения колебательной энергии первичных сигналов акустической эмиссии.

Таким образом, колебательная энергия акустической эмиссии сконцентрирована в низкочастотной области. Резонансный характер распределения спектральной плотности акустической эмиссии в низкочастотной области свидетельствует о формировании акустического поля стоячих волн в деформируемом объеме материала.

#### Пример 3

Проведем анализ низкочастотного спектра акустической в диапазоне от 10 до 100 кГц, полученного при нагреве нагруженного алюминиевого образца. На фиг. 4а, б представлен процесс накопления деформации в образце и сопровождающая акустическая эмиссия при нагреве образца до 650°C в условиях действия сдвиговой нагрузки величиной

25 МПа. Процесс накопления деформации при нагреве до 560°C (область I) носит монотонный характер. После 560°C накопление деформации представляет собой скачкообразные акты, перемежающиеся монотонными участками (область II). Монотонному характеру накопления деформации в области I соответствует акустическая эмиссия, среднеквадратичное напряжение которой монотонно возрастает при повышении температуры. Скачкообразному характеру накопления деформации в области II соответствует дискретная акустическая эмиссия.

Проанализируем низкочастотную область спектральной плотности сигналов акустической эмиссии, характерную для области I накопления деформации. На фиг. 5 представлено распределение спектральной плотности, характерное для монотонного накопления деформации. Характерной особенностью спектра является его дискретный вид, представляющий собой совокупность низкочастотных пиков спектральной плотности сигналов акустической эмиссии, расположенных в частотном диапазоне примерно 20-50 кГц. В полосе частот 60-100 кГц спектральная плотность сигналов близка к спектральной плотности шума.

Проанализируем низкочастотную спектральную плотность сигналов акустической эмиссии, характерную для накопления деформации в области II (фиг. 6). Как следует из данных фиг. 6 наблюдается значительное усложнение спектра, в нем появились спектральные составляющие в диапазоне 60-90 кГц, которые при монотонном накоплении деформации слабо выражены.

Усложнение спектра, обусловленное появлением новых спектральных составляющих акустического поля акустической эмиссии и существенным возрастанием спектральной плотности в интервале частот 60-90 кГц, свидетельствует о накоплении колебательной энергии в маломасштабных резонаторах.

#### Пример 4

Рассмотрим совокупность резонаторов в системе образец-волновод в примере 3 (фиг. 7).

Волновод и образец представляют собой стержень цилиндрической формы общей длиной около 300 мм, часть которого длиной 30 мм и диаметром 4 мм представляет собой участок локализации деформации, который делит волновод на две части длиной 220 и 100 мм. Согласно, геометрии системы волновод - образец, выделяют в качестве резонаторов участок волновода в виде стержня длиной около 200 мм, передающий акустическую энергию в пьезопреобразователь, участок волновода в виде стержня длиной около 100 мм, которым наш образец крепится в устройстве нагружения, участок волновода длиной 30 мм и диаметром 4 мм, расположенный между этими двумя участками волновода, являющийся областью локализации сдвиговой деформации.

Проанализируем совокупность возможных резонаторов в нашей системе образец-волновод (табл. 1). Расчет геометрических параметров резонаторов проводят на основе условия стоячей волны

$$L=k\lambda/2, \text{ где}$$

L - размер акустического резонатора,

$\lambda$  - длина волны, k - номер резонанса,

при k=1 длина волны соответствует первому (основному) резонансу.

Длина волны определена согласно выражению  $\lambda=VT$ , где

V - скорость распространения акустических колебаний,

T - период колебания, связанный с частотой f резонанса выражением  $T=1/f$ .

При расчете учтено, что в деформируемом объеме распространяются волновые пакеты акустической эмиссии как на продольных, так и на поперечных волнах. Кроме

того, необходимо учесть, что при повышении температуры скорость распространения ультразвуковых колебаний уменьшается. Для алюминия и сплавов уменьшение достигает 17%.

В нашем случае важен резонатор, связанный с деформируемой частью длиной 30 мм. Из табл. 1 следует, что в деформируемом объеме диаметром 4,0 мм и длиной 30 мм в основном формируются стоячие поперечные (сдвиговые) волны, то есть накапливается сдвиговая колебательная энергия акустической эмиссии.

#### Пример 5

Из совокупности данных примеров 1-4 следует, что накопление деформации в сплавах алюминия при высоких температурах осуществляется двояким образом: в области I монотонному характеру накопления деформации соответствует монотонная акустическая эмиссия с низким значением колебательной энергии; в область II высокоскоростному (скачкообразному) накоплению соответствует акустическая эмиссия с высоким значением колебательной энергии. Переход из области I в область II, представляет собой деформационный структурный переход. Деформационному структурному переходу отвечают критические значения параметров термомеханического воздействия: механического напряжения в интервале 90-200 МПа, температуры в интервале 450-250°C, колебательной энергии акустической эмиссии не ниже  $15 \cdot 10^{-12} \text{ В}^2 \text{ с}$ .

Таким образом, активизация пластичности в ходе накопления деформации в области II осуществляется не только за счет действия механических напряжений и температуры, но и за счет формирования в деформируемом объеме материала ультразвукового поля стоячих волн акустической эмиссии, то есть пластическое поведение деформируемого материала определяется совместным действием тепловых флуктуаций теплового поля, статических смещений поля напряжений и динамических смещений акустического поля стоячих волн акустической эмиссии.

Типичным проявлением акустико-пластического эффекта является состояния аномальной пластичности при ультразвуковом облучении деформируемого образца. Следовательно к естественной пластичности, наведенной температурным воздействием, воздействием механическими напряжениями и полем динамических смещений стоячих акустических волн акустической эмиссии, добавляется пластичность, наведенная внешним ультразвуковым воздействием. Однако при длительном облучении ультразвуком частотой 20 кГц в поликристаллическом алюминии появляется избыточных вакансий. Высокая плотность вакансий ( $10^{20}$  вакансий/с при амплитуде колебаний 1 мкм) приводит к разрушению материала, обусловленного интенсивным порообразованием по границам зерен.

Таким образом, действие внешнего ультразвукового облучения необходимо ограничить только длительностью накопления деформации в области II, где естественная пластичность суммируется с пластичностью наведенной внешним ультразвуковым воздействием. Начало процесса накопления деформации в области II определяется достижением температурой, механическим напряжением и колебательной энергией поля стоячих волн акустической эмиссии критических значений, приведенных выше. Частота ультразвуковых колебаний в нашем случае выбирается в диапазоне 60-90 кГц и определяется резонансными свойствами деформируемого объема. Разумеется, при изменении геометрии деформируемого объема изменяются резонансные свойства резонатора. Это обстоятельство требует корректировки частотного диапазона внешнего ультразвукового воздействия в диапазоне 20-90 кГц. Корректировки внутреннего

акустического поля стоячих волн акустической эмиссии не требуется, так как процесс формирования акустических стоячих волн акустической эмиссии, определяемый геометрией резонатора, устанавливается автоматически.

Таблица 1.

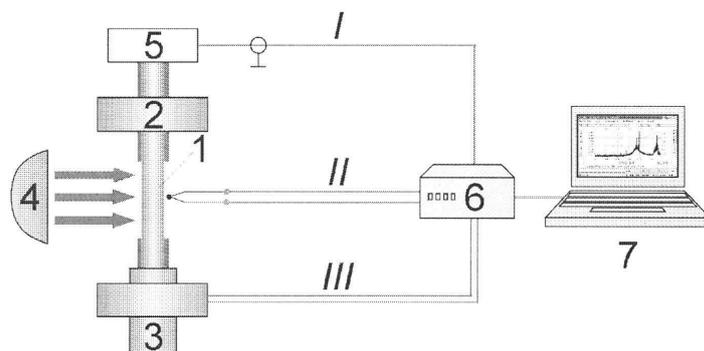
Номер резонанса	Частоты, Гц	L, мм, продольная волна, k=1, V=6420м/с	L, мм, сдвиговая волна, k=1, V=3040м/с	L, мм, сдвиговая волна, k=1, V=2530м/с
1	35700	89,9	42,6	35,4
2	41500	77,3	36,6	30,5
3	44500	72,1	34,2	28,4
4	45800	70,1	33,2	27,6
5	47900	67,0	31,7	26,4
6	49400	65,0	30,8	25,6
7	54000	59,4	28,1	23,4
8	67400	47,6	22,6	18,8
9	86000	37,3	17,7	14,7
10	88500	36,3	17,2	14,3

Параметры акустических резонаторов системы образец - волновод.

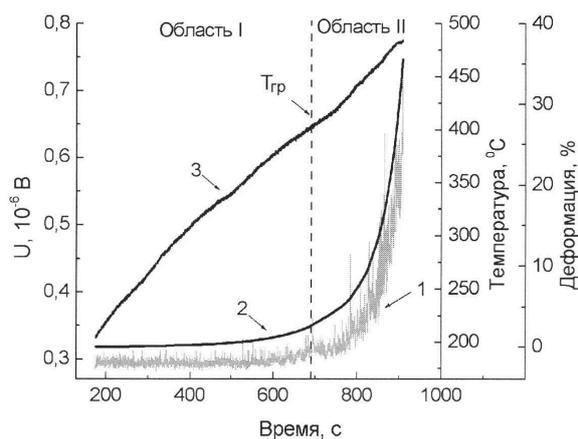
(57) Формула изобретения

Способ пластической деформации алюминия и его сплавов, включающий механическое нагружение деформируемого объема образца-резонатора при температурном и ультразвуковом воздействии, отличающийся тем, что механическое нагружение осуществляют при напряжении 90-200 МПа в интервале температур 450-250°C, при этом в процессе нагружения измеряют колебательную энергию акустической эмиссии и при достижении ею значений не ниже  $15 \cdot 10^{-12} \text{ В}^2\text{с}$ , соответствующих деформационному структурному переходу, осуществляют ультразвуковое воздействие с частотой, выбираемой из низкочастотного диапазона 20-90 кГц и определяемой геометрией деформируемого объема образца-резонатора.

1

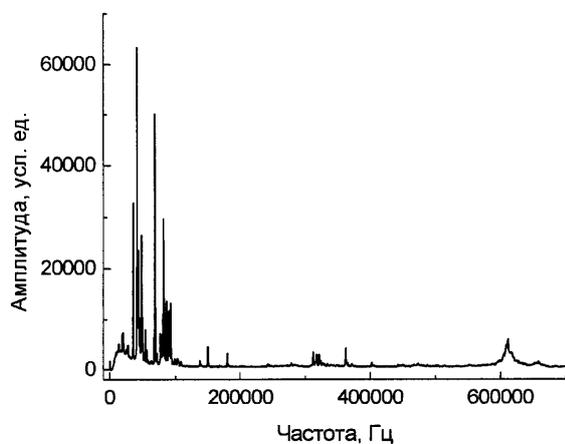


Фиг. 1. Схема установки для высокотемпературного деформирования металлов:  
 1 – образец в виде стержня; 2 – неподвижный захват установки; 3 – подвижный захват установки с устройством нагружения и измерения деформации; 4 – нагревательный элемент; 5 – пьезопреобразователь сигналов акустической эмиссии; 6 – аналогоцифровой преобразователь; 7 – компьютер; символы I, II, III обозначают соответственно акустический канал, канал измерения температуры, канал измерения деформации.

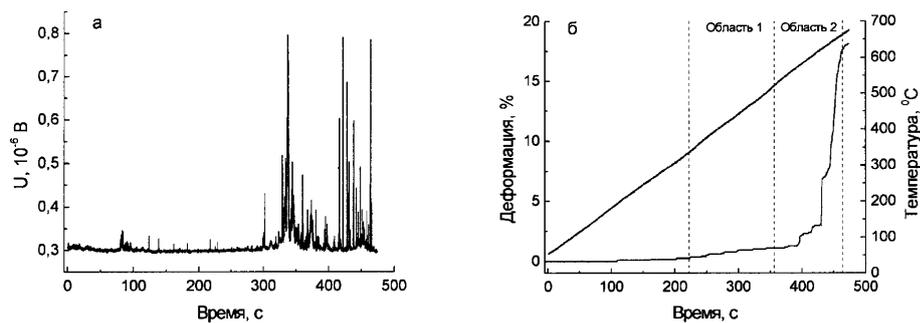


Фиг. 2. Среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (1) и деформация (2) в сплава АМгб при нагрузке 120 МПа в ходе неизотермического термомеханического цикла: 3 – температура в ходе нагрева. I и II – низкотемпературная и высокотемпературная области накопления деформации.

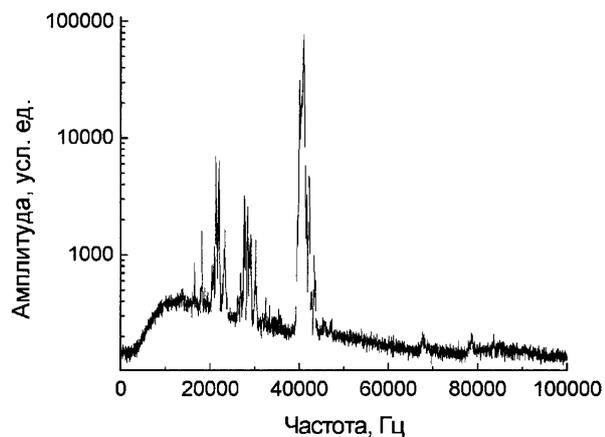
2



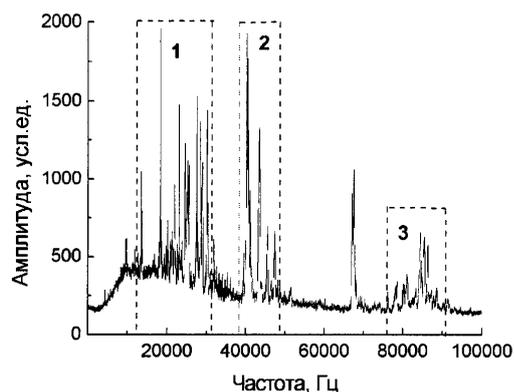
Фиг. 3. Распределение спектральной плотности сигналов акустической эмиссии при деформировании алюминия в ходе нагрева под нагрузкой.



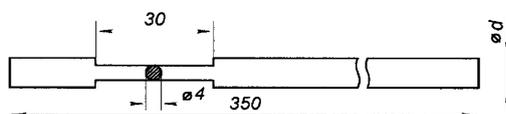
Фиг. 4. Акустическая эмиссия (а) и накопление деформации (б) при нагреве до 650 °С алюминиевого образца, нагруженного сдвиговой нагрузкой величиной 25 МПа. Область I – монотонное накопление деформации; область II - скачкообразное накопление деформации.



Фиг. 5. Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии, соответствующей монотонному накоплению деформации при нагреве нагруженного алюминиевого образца.



Фиг. 6. Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии, соответствующая скачкообразному накоплению деформации в области II: 1, 2, 3 выделенные участки спектральной плотности, соответствующие резонансам на разных участках волновода и образца.



Фиг. 7. Система образец-волновод, выделенная область диаметром 4 мм и длиной 30 мм представляет собой деформируемый объем системы.