



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
C22F 1/04 (2020.02)

(21)(22) Заявка: 2019133267, 17.10.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
17.10.2019

Дата регистрации:  
22.06.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.10.2019

(45) Опубликовано: 22.06.2020 Бюл. № 18

Адрес для переписки:

656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, ФГБОУ ВО  
"Алтайский государственный университет",  
ЦРТПТТУИС

(72) Автор(ы):

Макаров Сергей Викторович (RU),  
Плотников Владимир Александрович (RU),  
Евтушенко Евгений Евгеньевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

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

(56) Список документов, цитированных в отчете

о поиске: RU 2639278 C2, 20.12.2017. RU  
2661980 C1, 23.07.2018. JP 2006274312 A,  
12.10.2006. CN 201212054 Y, 25.03.2009. EP  
2918690 A1, 16.09.2015.

(54) Способ пластической деформации алюминия и его сплавов

(57) Реферат:

Изобретение относится к области пластической обработки металлов, в частности к способу пластической деформации алюминия и его сплавов, заключающийся в одновременном термомеханическом и ультразвуковом воздействии. Ультразвуковое воздействие на металл или сплав осуществляется в ходе всего процесса термомеханического воздействия и формируется приложением к ультразвуковому пьезодатчику низковольтного переменного напряжения амплитудой 50 мВ на частоте

основного резонанса, определяемого геометрией деформируемого объема образца. Способ обеспечивает повышение ресурса пластичности сплава при одновременном воздействии механического напряжения, температуры, стоячих волн, сформированных акустической эмиссией и низкоамплитудными ультразвуковыми колебаниями внешнего источника при пластическом деформировании алюминия и его сплавов. 3 табл., 5 ил., 5 пр.

RU  
2 7 2 4 2 0 9  
C 1

RU  
2 7 2 4 2 0 9  
C 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*C22F 1/04 (2020.02)*

(21)(22) Application: **2019133267, 17.10.2019**

(24) Effective date for property rights:  
**17.10.2019**

Registration date:  
**22.06.2020**

Priority:

(22) Date of filing: **17.10.2019**

(45) Date of publication: **22.06.2020** Bull. № 18

Mail address:

**656049, g. Barnaul, pr. Lenina, 61, FGBOU VO  
"Altajskij gosudarstvennyj universitet",  
TSRTPPTUIS**

(72) Inventor(s):

**Makarov Sergej Viktorovich (RU),  
Plotnikov Vladimir Aleksandrovich (RU),  
Evtushenko Evgenij Evgenevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

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

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

(57) Abstract:

FIELD: technological processes.

SUBSTANCE: invention relates to plastic processing of metals, in particular to method of plastic deformation of aluminum and its alloys, consisting in simultaneous thermomechanical and ultrasonic action. Ultrasound action on metal or alloy is carried out during the whole process of thermomechanical action and is formed by application to ultrasonic piezoelectric transducer of low-voltage alternating voltage with

amplitude of 50 mV at frequency of main resonance determined by geometry of deformed volume of sample.

EFFECT: method provides increased service life of plasticity of alloy at simultaneous action of mechanical stress, temperature, standing waves formed by acoustic emission and low-amplitude ultrasonic oscillations of external source at plastic deformation of aluminum and its alloys.

1 cl, 3 tbl, 5 dwg, 5 ex

Изобретение относится к области пластической обработки металлов может быть использовано в различных областях промышленности и науки для глубокого формования металлических материалов.

5 Известен акустопластический эффект [Blaha, B. Langenecker // 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.

10 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. В технологических процессах,  
15 например, 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 магнитострикционным преобразователем. При одновременном воздействии  
20 ультразвуковых колебаний частотой 20 кГц и статических нагрузок, например, 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  
25 длительного ультразвукового воздействия на деформируемый материал, фактически ограничивающий использование ультразвука на практике.

Известно, что при размещении образца в узле стоячей волны увеличивается скорость ползучести в меди [2] и алюминии [3] при воздействии продольной стоячей волной частотой 20 кГц. Эффект наблюдают при совместном действии статических напряжений  
30 величиной до  $10^7$  Па и динамических напряжений величиной до  $10^8$  Па. Недостатки, как и в предыдущем случае, разрушение материала при длительном ультразвуковом воздействии в ходе ползучести.

Известен способ пластической деформации алюминия и его сплавов [4] в условиях механического нагружения, воздействия температуры и ультразвука. Согласно этому  
35 способу 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, соответствующим деформационному структурному переходу в деформируемом материале.

40 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 соответствии ставится механическое напряжение и достигнутая температура.

45 Выбор этого момента ультразвукового воздействия и определяет недостатки способа и усложняет его реализацию.

Задача изобретения - упрощение реализации способа; повышение ресурса пластичности металла (сплава) в условиях одновременного воздействия механического

напряжения, температуры, стоячих волн, сформированных акустической эмиссией и низкоамплитудными ультразвуковыми колебаниями внешнего источника при пластическом деформировании алюминия и его сплавов.

5 Поставленная задача достигается тем, что ультразвуковое воздействие на металл или сплав осуществляется в ходе всего процесса термомеханического воздействия.

Ультразвуковое воздействие осуществляют низкоамплитудными ультразвуковыми колебаниями на частоте, выбираемой из низкочастотного диапазона 20-100 кГц, отвечающей основным резонансам акустической эмиссии, определяемым геометрией образца-резонатора, то есть геометрией деформируемого объема металла или сплава.  
10 Для исключения негативного влияния генерирования избыточной концентрации точечных дефектов в ультразвуковом поле амплитуда колебаний составляет около 50 мВ. В этой связи возбуждение ультразвука осуществляется через волновод с помощью пьезодатчика на основе пьезокерамики ЦТС-19, подключенного к маломощному генератору колебаний.

15 При достижении критических параметров температурно-силового термомеханического воздействия и критического значения колебательной энергии акустической эмиссии соответствующим деформационному структурному переходу в деформируемом алюминии и его сплавах, акустическая эмиссия и внешний ультразвук формируют общее акустическое поле стоячих волн, в том числе и на резонаторах  
20 связанных с деформируемым объемом, колебательная энергия которого превосходит критическое значение колебательной энергии только акустической эмиссии, что обеспечивает существенное повышение пластичности материала.

Способ реализуется следующим образом

1. Подготовленные образцы из алюминия или алюминиево-магниевых сплавов  
25 размещают в установку для высокотемпературного механического и ультразвукового воздействия.

2. Образцы нагружают механическим напряжением около предела текучести: алюминий - 15 МПа, алюминиево-магниевого сплавы 90-200 МПа.

3. Нагруженные образцы нагревают:  
30 алюминий до температуры в интервале 480-640°C;  
алюминиево-магниевого сплавы - для напряжения 90 МПа температура не ниже 450°C, для напряжения 200 МПа температура не ниже 250°C,  
регистрируя прирост деформации и акустическую эмиссию.

4. Низкоинтенсивные ультразвуковые колебания возбуждаются с помощью  
35 пьезокерамического преобразователя на основе пьезокерамики ЦТС-19 и вводятся в деформируемый образец с помощью волновода одновременно с началом термомеханического воздействия.

5. Частота генератора ультразвуковых колебаний соответствует основным резонансам акустического поля стоячих волн, сформированного как за счет  
40 преобразования первичных сигналов акустической эмиссии на естественных резонаторах, одним из которых является деформируемый объем, так и путем преобразования ультразвуковых волн на этих же резонаторах.

6. Возбуждение низкоинтенсивных ультразвуковых волн в системе образец - волновод обеспечивается пьезокерамическим преобразователем, преобразующим электрические  
45 колебания генератора амплитудой 50 мВ в механические.

Основной прирост деформации осуществляется в ходе деформационного структурного перехода, когда колебательная энергия акустической эмиссии не ниже  $15 \cdot 10^{-12}$  В<sup>2</sup>с, а внешний поток ультразвуковых колебаний, преобразуясь на естественных резонаторах,

формирует совместное акустическое поле стоячих волн в низкочастотном диапазоне от 20 до 100 кГц., колебательная энергия которого существенно выше колебательной энергии акустической эмиссии, что повышает ресурс пластичности и обеспечивает накопление больших пластических деформаций.

5 Совмещение ультразвукового и термомеханического воздействия упрощает реализацию способа.

Изобретение поясняется графическими материалами:

Фиг. 1. Образец в виде двух волноводов А и В, совмещенных с участком локализации деформации длиной 40 мм и диаметром 4 мм.

10 Фиг. 2. 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 - нагреватель; 5 - аналогоцифровой преобразователь и компьютер. Символы I, II, III, IV, V обозначают соответственно канал акустической эмиссии, канал измерения температуры, канал измерения деформации, канал измерения механического напряжения, канал ввода  
15 ультразвука в составе пьезопреобразователя и генератора.

Фиг. 3. Спектральная плотность акустического поля стоячих волн, возбуждаемых в системе образец-волновод внешним генератором на частоте около 80 кГц и амплитудой сигнала 50 мВ. 7 - частота резонанса 35,4 кГц (35400 Гц), 8 - частота резонанса 80 кГц  
20 (79900 Гц).

Фиг. 4. Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии в ходе накопления деформации в отсутствие внешнего ультразвукового воздействия.

Фиг. 5. Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии в ходе накопления деформации в условиях действия внешнего источника ультразвуковых колебаний.

25 Примеры конкретного исполнения

Пример 1

Металлический образец из алюминия или алюминиево-магниевого сплава АМгб в виде стержня (фиг. 1), представляет собой два волновода А и В, между которыми расположен участок стержня длиной 40 мм и диаметром 4 мм в виде концентратора  
30 напряжений, в котором локализуется деформационный процесс. Волновод «А» обеспечивает передачу акустических колебаний от внешнего источника ультразвуковых колебаний к деформируемому объему, а волновод «В» обеспечивает передачу акустического потока сигналов акустической эмиссии к приемнику. Образец помещают в установку для термического и механического воздействия, представленную на фиг  
35 2.

Образец 1 закрепляют в неподвижном захвате 2, нагружают механической нагрузкой величиной около 15 МПа с помощью подвижного захвата 3, нагревают элементом 4 до 620°C. Прирост деформации измеряется по каналу III компьютерной программой компьютера 5. По каналу IV информация о механической нагрузке поступает также в  
40 компьютер 5. Одновременно с нагружением и нагревом излучающий пьезодатчик канала V, подключенный к генератору электрических колебаний, формирует в волноводе А продольную акустическую волну, которая распространяется по волноводам и области локализации деформации, достигая приемного пьезопреобразователя канала I. Сигналы акустической эмиссии, генерируемые в ходе деформирования области локализации  
45 образца 1, и акустические волны, генерируемые излучающим пьезопреобразователем канала V, регистрируются и обрабатываются компьютером 5.

Пример 2

Проведем анализ спектра акустического поля стоячих волн, сформированного в

системе образец-волновод с помощью внешнего генератора сигналов на частоте 80 кГц и амплитудой сигнала 50 мВ. Анализ спектра проводят методом быстрого преобразования Фурье. На фиг. 3 приведено распределение спектральной плотности акустического поля в диапазоне от 10 кГц до 140 кГц, зарегистрированных с помощью датчика акустической эмиссии канала I в ходе возбуждения ультразвука в системе образец-волновод каналом V.

Как следует из приведенных на фиг. 3 данных наблюдаются два резонансных пика: один на частоте 35,4 кГц, (35400 Гц) второй на частоте 80 кГц (79900 Гц). Резонанс на частоте 80 кГц очевидно связан с продольной стоячей волной, так как частота генератора была выбрана из условия стоячей продольной волны

$$L=k\lambda/2, \text{ где}$$

L - размер акустического резонатора, равный размеру деформируемого объема, то есть размеру концентратора длиной 40 мм,  $\lambda$  - длина продольной волны, k - номер резонанса, при k=1 длина волны соответствует первому (основному) резонансу, а пьезопреобразователь возбуждал в волноводе именно продольную волну. Следует заметить, что частота 80 кГц соответствует резонансу на резонаторе (концентраторе механических напряжений) в условиях, когда отсутствует деформационный процесс. То есть 80 кГц - это резонансный отклик исходного объема образца. В ходе накопления деформации геометрия деформационного объема меняется в небольших пределах, в этой связи будет меняться и резонансные частоты, оставаясь вблизи выделенных значений 80 и 35, 4 кГц..

Резонанс на частоте 35,4 кГц связан с акустическим полем поперечных волн. Хорошо известно [5], что при возбуждении в цилиндрическом волноводе продольной волны, при взаимодействии ее со стенкой волновода под критическим углом происходит трансформация продольной волны в поперечную, то есть в волноводе распространяется продольный фронт и цуги (волновые пакеты) поперечных волн. Таким образом, в системе образец волновод формируется сложное акустическое поле стоячих продольных и поперечных волн.

### Пример 3

Были проделаны многократные циклы по накоплению деформации в алюминии при нагреве до 620°C и нагрузке 15 МПа без участия внешнего ультразвука (нечетные циклы) и с участие внешнего ультразвука (четные циклы). В табл. 1 и 2 представлены результаты накопления деформации в нечетных и четных циклах.

Табл. 1. Деформация в нечетных циклах

№ цикла	Деформация, %
1	0,13
3	0,18
5	0,13
7	0,26
9	1,03

Табл. 2. Деформация в четных циклах

№ цикла	Деформация, %
2	0,35
4	0,87
6	0,30
8	0,12
10	4,8

Как следует из данных табл. 1 и 2 величина накапливаемой деформации в цикле с ультразвуковым воздействием (четные циклы) многократно превосходит деформацию в циклах (нечетные циклы) без ультразвукового воздействия. Это подтверждает повышение пластичности в акустическом поле, являющимся результатом резонансного сложения поля стоячих волн акустической эмиссии и поля стоячих волн внешнего ультразвука на частоте основного резонанса.

#### Пример 4

Проведем анализ спектральной плотности акустического поля сформированного первичными сигналами акустической эмиссии (фиг. 4) и совместно с внешним источником ультразвука (фиг. 5) амплитудой 50 мВ на частоте первичного сигнала 80 кГц в ходе деформирования алюминиевого образца.

Данные фиг. 4 и 5 свидетельствуют, что в отсутствие внешнего источника колебаний спектральная плотность поля акустических стоячих волн значительно ниже спектральной плотности основных резонансов при внешнем ультразвуковом воздействии, являющихся результатом резонансного сложения акустического поля стоячих волн, сформированного первичными сигналами акустической эмиссии, и акустического поля стоячих волн, сформированного ультразвуковыми волнами внешнего источника колебаний. Следует заметить, что повышение амплитуды основных резонансов на частотах 35 и 80 кГц с участием внешнего ультразвука сопровождается дополнительными резонансами в интервале частот 60-80 кГц, свидетельствующими о трансформации деформируемого объема образца. Таким образом, при воздействии внешним источником ультразвука наблюдается повышение колебательной энергии поля стоячих продольных и поперечных волн, сформированных первичными сигналами акустической эмиссии, за счет резонансного суммирования с акустическим полем стоячих волн, сформированных внешним источником ультразвуковых колебаний, что существенно повышает пластичность деформируемого металла.

#### Пример 5

Проведем анализ геометрии деформируемого объема (резонатора), используя данные по спектральной плотности, полученные в примере 4 (табл. 3). Размер резонатора определен согласно формуле, приведенной в примере 2

$$L=k\lambda/2, \text{ где}$$

L - размер акустического резонатора, равный размеру деформируемого объема, то есть размеру концентратора 40 мм,  $\lambda$  - длина продольной волны, k - номер резонанса, при k=1 длина волны соответствует первому (основному) резонансу. Длина волны определена как  $\lambda=C/f$ , где C - скорость продольной или поперечной волны в алюминии, f - частота резонанса. Скорость продольной волны в алюминии равна 6420 м/с, скорость поперечной волны - 3040 м/с.

Табл. 3. Геометрия деформируемого объема, рассчитанная из условия стоячей продольной и поперечной волн

№ Цикла	Частота резонансов, Гц	Амплитуда резонанса, Усл. Ед.	Размер резонатора для продольной длины волны, м	Размер резонатора для поперечной длины волны, м
8	37537	$1,2 \cdot 10^4$		0,040
	80261	$1,07 \cdot 10^6$	0,037	
9	35400	$6,88 \cdot 10^5$		0,042
	76599	$6,18 \cdot 10^4$	0,040	
10	35400	$1,16 \cdot 10^6$		0,042
	80566	$3,1 \cdot 10^7$	0,037	
11	35400	$2,04 \cdot 10^5$		0,042
	76904	$1,26 \cdot 10^5$	0,039	

Из приведенных в табл. 3 данных следует, что как на продольных, так и на поперечных волнах два основных резонанса на частотах около 35 и 80 кГц связаны с резонатором, представляющим собой деформируемый объем длиной около 40 мм. Резонансы наблюдаются как в четных, так и в нечетных циклах на продольных и поперечных волнах.

Как было уже сказано [1] в технологических процессах амплитуда динамических напряжений лежит в диапазоне  $10^7$ - $10^8$  Па. В сопоставлении с приведенными примерами 2-5 такие значения динамических напряжений запредельны. Не случайно, что длительное ультразвуковое воздействие с такими амплитудами приводит к разрушению деформируемого образца. Очевидно, такие параметры ультразвука используются на практике в связи с тем, что не учитываются резонансные свойства деформируемого объема образца (детали). Более того, не учитываются резонансы сигналов акустической эмиссии, которые, преобразуясь в стоячие акустические волны на естественных резонаторах деформируемого объема, обеспечивают активацию и корреляцию элементарных деформационных сдвигов в макроскопическом масштабе. Этот масштаб (масштаб корреляции) определяется длиной стоячей акустической волны, равной в нашем случае геометрическим размерам области локализации деформации. Резонансное сложение, точнее резонансная суперпозиция спектральных составляющих акустической эмиссии и внешнего ультразвука, сопровождается существенным повышением амплитуд основных спектральных составляющих, что приводит к накоплению в деформируемом объеме значительной по величине колебательной энергии стоячих акустических волн. Эта колебательная энергия в совокупности со статическим напряжением, приложенным к образцу, и термическими флуктуациями теплового поля и определяют аномально высокую пластичность деформируемого металла.

Согласно примерам 2-5 высокотемпературное деформирование образца в условиях действия внешнего низкоамплитудного ультразвука амплитудой 50 мВ, сопровождается существенным повышением колебательной энергии поля стоячих продольных и поперечных волн, сформированного как первичными сигналами акустической эмиссии (фиг. 4), так и при участии внешнего источника ультразвука (фиг. 5). Это поле (как результат резонансной суперпозиции) и создает эффект аномально высокой пластичности деформируемого объема образца (резонатора), что позволяет накапливать значительные по величине пластические деформации (примеры 3-5).



## Литература

1. Blaha, B. Langenecke // Naturwiss. Rundsch. - 1955. - 42. - Н.20. - S. 556.

2. Жернов С.А., Омеляненко И.Ф., Сиренко А.Ф. Высокотемпературная ползучесть и разрушение меди в поле ультразвука // ФММ. 1984. Т. 58. №3. С. 589-595.

5 3. Ушаков В.И., Омеляненко И.Ф., Сиренко А.Ф. Ползучесть алюминия и его сплавов в поле ультразвука // ФММ. 1985. Т. 59. №5. С. 584-592.

4. Макаров С.В., Плотников В.А. Способ пластической деформации алюминия и его сплавов. Патент РФ №2661980 от 23.07.2018.

10 5. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. - М.: Изд-во Иностранной литературы, 1957. - 726 с.

## (57) Формула изобретения

Способ пластической деформации алюминия и его сплавов, включающий одновременное термомеханическое и ультразвуковое воздействие, отличающийся тем, что ультразвуковое воздействие формируют приложением к ультразвуковому пьезодатчику низковольтного переменного напряжения амплитудой 50 мВ на частоте основного резонанса, определяемого геометрией деформируемого объема образца.

20

25

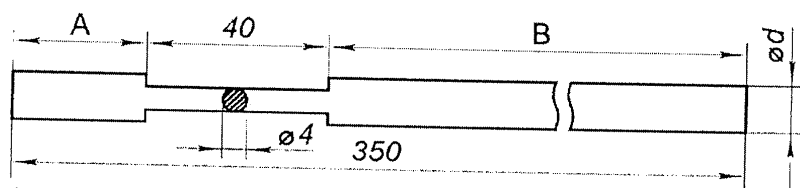
30

35

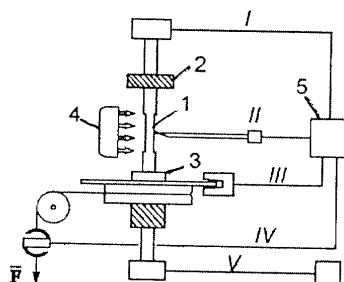
40

45

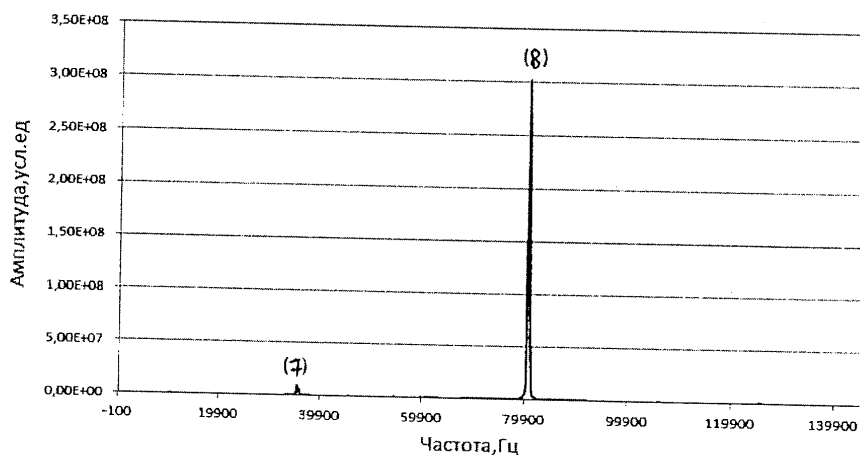
1



Фиг. 1 Образец в виде двух волноводов А и В, совмещенных с участком локализации деформации длиной 40 мм и диаметром 4 мм.

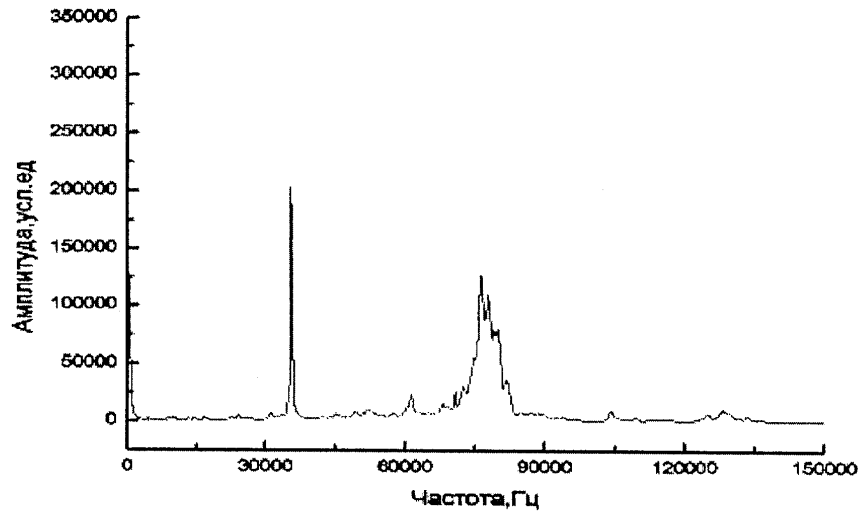


Фиг. 2 Схема установки для высокотемпературного деформирования металлов: 1 – образец в виде стержня; 2 – неподвижный захват установки; 3 – подвижный захват установки с устройством нагружения и измерения деформации; 4 – нагреватель; 5 – аналогоцифровой преобразователь и компьютер. Символы I, II, III, IV, V обозначают соответственно канал акустической эмиссии, канал измерения температуры, канал измерения деформации, канал измерения механического напряжения, канал ввода ультразвука в составе пьезопреобразователя и генератора.

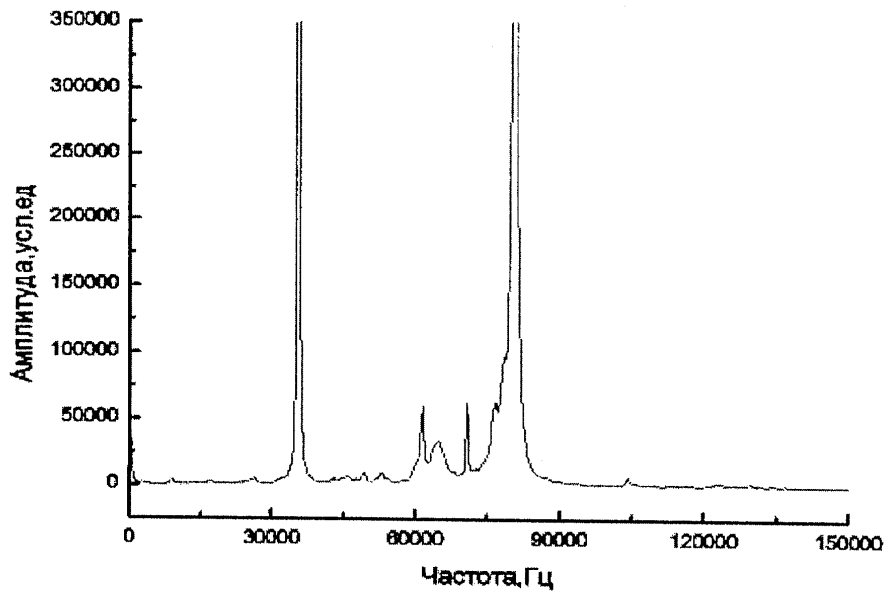


Фиг. 3 Спектральная плотность акустического поля стоячих волн, возбуждаемых в системе образец-волновод внешним генератором на частоте около 80 кГц и амплитудой сигнала 50 мВ. 7 – частота резонанса 35,4 кГц (35400 Гц), 8 – частота резонанса 80 кГц (79900 Гц).

2



Фиг. 4 Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии в ходе накопления деформации в отсутствие внешнего ультразвукового воздействия.



Фиг. 5 Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии в ходе накопления деформации в условиях действия внешнего источника ультразвуковых колебаний.