

# Сварка давлением титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности

Круглов А.А., Мухаметрахимов М.Х.<sup>†</sup>

<sup>†</sup> msia@mail.ru

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Халтурина 39, 450001 Уфа

## Pressure welding of Ti-6Al-4V alloy under conditions of low temperature superplasticity

A.A. Kruglov, M.Kh. Mukhametrakhimov

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

Приведены результаты экспериментов по сварке давлением титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности. Показано, что чем ниже температура, тем выше должно быть значение давления относительно напряжения течения при этой температуре. При этом качество твердофазного соединения титанового сплава ВТ6 существенно зависит от степени деформации.

**Ключевые слова:** сварка давлением, титановый сплав, низкотемпературная сверхпластичность.

The results of pressure welding experiments of VT6 titanium alloy in low-temperature superplasticity conditions are presented. It is shown that the lower is welding temperature, the higher should be the value of the pressure applied, regarding the flow stress at this temperature. The quality of the solid bonding of VT6 titanium alloy essentially depends on the strain.

**Keywords:** pressure welding, titanium alloy, low temperature superplasticity.

### 1. Введение

В период с 1951 по 1961 г. профессором Н.Ф. Казаковым был разработан принципиально новый способ соединения материалов – диффузионная сварка в вакууме [1]. При диффузионной сварке сварное соединение образуется в результате совместного воздействия давления и нагрева. Отличительной особенностью диффузионной сварки является применение относительно высоких температур нагрева  $(0,5-0,7)T_{пл}$  и низких удельных давлений, обычно не превышающих предела текучести свариваемых материалов при температуре сварки [1,2].

Способность титана растворять кислород при нагреве в вакууме и тем самым способствовать очистке свариваемых поверхностей от оксидов в процессе соединения, выделяет его среди других материалов. Поэтому в промышленности диффузионная сварка в основном применяется для изготовления сварных конструкций из титановых сплавов.

При диффузионной сварке выделяют две основные стадии образования соединения. Первая стадия – создание физического контакта, в результате которого все точки соединяемых поверхностей находятся друг от дру-

га на расстоянии межатомных взаимодействий. Вторая стадия – формирование структуры сварного соединения под влиянием процессов релаксации. Формирование качественного соединения при диффузионной сварке обеспечивается в условиях сверхпластичности [3,4]. В первую очередь за счет зернограницного проскальзывания (ЗГП), в результате которого, как показано в работе [4], устраняются поры. На основании экспериментальных результатов в работах [4-6] сделан вывод, что образование твердофазного соединения (ТФС) имеет деформационную природу. Благодаря деформации сминаются микровыступы на соединяемых поверхностях, развивается ЗГП – основной механизм сверхпластичности [7], активно протекают релаксационные процессы.

Титановый сплав ВТ6 или его зарубежный аналог Ti-6Al-4V широко применяются в промышленности для изготовления конструкций диффузионной сваркой. Для сплава ВТ6 с размером зерен от 2 до 10 мкм традиционная температура сварки лежит в интервале 900-925°C, а время выдержки при постоянном давлении, равном  $(0,1-0,2)\sigma_p$ , составляет от 1 до 3 часов [8]. Такие условия близки к условиям ползучести, а общая деформация соединяемых частей не превышает 2%.

Чем больше степень деформация при диффузионной сварке, тем выше качество соединения, которое характеризуется количеством оставшихся дефектов (пор) в зоне соединения и его прочностью. Для увеличения степени деформации используют схему принудительного деформирования, когда нагрузку прикладываю, используя специальные устройства, например, пуансон. Однако не каждая свариваемая конструкция позволяет реализовать большие степени деформации.

Давление при сварке без расплавления выполняет три важные задачи: сближение свариваемых поверхностей; активация поверхности для протекания процессов диффузии; обеспечение релаксационных процессов, таких как ЗГП и т.д. При принудительном деформировании за счет деформации также происходит разрушение поверхностных слоев и частичное удаление окисных пленок и загрязнений, т.е. решается четвертая задача. Поэтому способ сварки путем воздействия давления и нагрева в вакууме – позволяет называть его сваркой давлением (СД). Попутно отметим, что деформация активизирует и диффузионные процессы, которые ответственны в первую очередь за очистку соединяемых поверхностей.

Как любой высокотемпературный процесс СД имеет недостатки и ограничения. Снижение температуры, как показали результаты [9] возможно за счет уменьшения размера зерен, путем формирования наноструктурного состояния (НС) [10]. Известные методы подготовки НС в титановых сплавах [11,12] обеспечивают получение объемных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6 с размером зерен 200-400 нм. Указанный размер зерен приводит к проявлению сплавом эффекта низкотемпературной сверхпластичности [13,14], который можно использовать для повышения эффективности технологий СД.

В представленной работе на основе экспериментальных результатов, предложен методологический подход к выбору технологических параметров, обеспечивающих получение качественного соединения сваркой давлением в условиях низкотемпературной сверхпластичности.

## 2. Материал и методика исследования

Материалом для исследования являлся титановый сплав ВТ6 с химическим составом, соответствующим ГОСТ 19807-91. Использовали листы толщиной 0,8 и 1 мм, имеющие специально подготовленную структуру, со средним размером зерен ( $d$ ) 200 и 400 нм. Также использовали цилиндрические заготовки с  $d$ , равным 200 и 400 нм, из которых вырезали образцы для соединения.

Предварительно НС состояние подготавливали в цилиндрических заготовках диаметром 70 мм. Закаленные из однофазной  $\beta$ -области образцы подвергали изотермической ковке в интервале температур 500-700°C с изменением осей деформирования на гидравлическом прессе ПА-2462. Многократную ковку заготовок на каждом этапе обработки проводили, сочетая операции осадки и вытяжки со сменой осей деформирования. Общая истинная степень деформации на этапе при каждой температуре обработки была не менее 3. Количество этапов составляло 6-8 [11].

Объемные НС заготовки сплава ВТ6 подвергали фрезерованию для придания им плоскопараллельной формы и затем прокатывали в изотермических условиях при температуре 550°C на стане для изотермической прокатки ЛИС-6/200 до требуемой толщины [12].

Соединение листовых заготовок выполняли в штамповой оснастке, включающей силовые плиты и крепежные элементы. Штамповую оснастку, в зависимости от размеров, устанавливали в вакуумную печь СНВЭ-1,3.1/16-ИЗ-УХЛЧ.1 или ОКБ-8086. Давление к заготовкам прикладывали с помощью гибкой мембраны. В качестве мембраны использовали герметичный пакет, изготовленный из двух листов титанового сплава, снабженный штуцером. Сварочное давление создавали подачей газообразного аргона в полость пакета через штуцер. Для увеличения сварочного давления усилие от мембраны к листовым заготовкам передавали через пуансон. Температура сварки составляла от 550 до 800°C.

Соединение объемных заготовок исследуемого сплава проводили, используя усовершенствованную вакуумную установку на базе ИМАШ 20-78, обеспечивающую принудительное сжатие свариваемых образцов. Размеры образцов 6 × 6 × 22 мм. Соединение выполняли в интервале температур от 600 до 750°C. Степень деформации в зоне соединения варьировали в пределах от 5 до 35%.

Механические испытания на растяжение и сдвиг проводили при комнатной температуре на универсальном динамометре фирмы «Instron» модели 1185 со скоростью деформирования 1 мм/мин. Образцы для испытаний на растяжение вырезали из соединенных объемных заготовок на электроискровом и фрезерном станках. Поверхность соединения ориентировали перпендикулярно оси растяжения. Образцы для испытаний на сдвиг вырезали на электроискровом станке. Поверхность соединения ориентировали параллельно оси нагружения.

При изучении механических свойств определяли следующие характеристики:  $\sigma_{0.2}$  - условный предел текучести,  $\sigma_b$  - предел прочности,  $\delta$  - относительное удлинение,  $\Psi$  - относительное сужение и  $\tau_{ср.}$  - прочность на сдвиг. Металлографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе «JEOL JXA-6400».

## 3. Результаты и их обсуждение

Оптически видимые дефекты, образующиеся в зоне соединения при СД, можно разбить на две группы: непровары, преимущественно щелевидной формы, и поры, преимущественно круглой формы. Металлографический анализ сварных соединений НС листовых заготовок при  $T = 800^\circ\text{C}$  и степенях деформации  $\varepsilon = 1, 2$  и 3% показал, что с увеличением степени деформации дефекты меняют размеры и протяженность. При увеличении степени деформации от 1 до 3% происходит уменьшение количества и размера пор (рис. 1). При  $\varepsilon = 1\%$ , поры имеют размер 4,4 мкм, распределены равномерно по всей линии соединения, протяженность их составляет 0,48. При  $\varepsilon = 2\%$  протяженность пор уменьшается в 2,5 раза, а их размер уменьшается в 4 раза. Распределение пор вдоль линии соединения уже неравномерное. При  $\varepsilon = 3\%$  в зоне соединения присутствуют только единич-

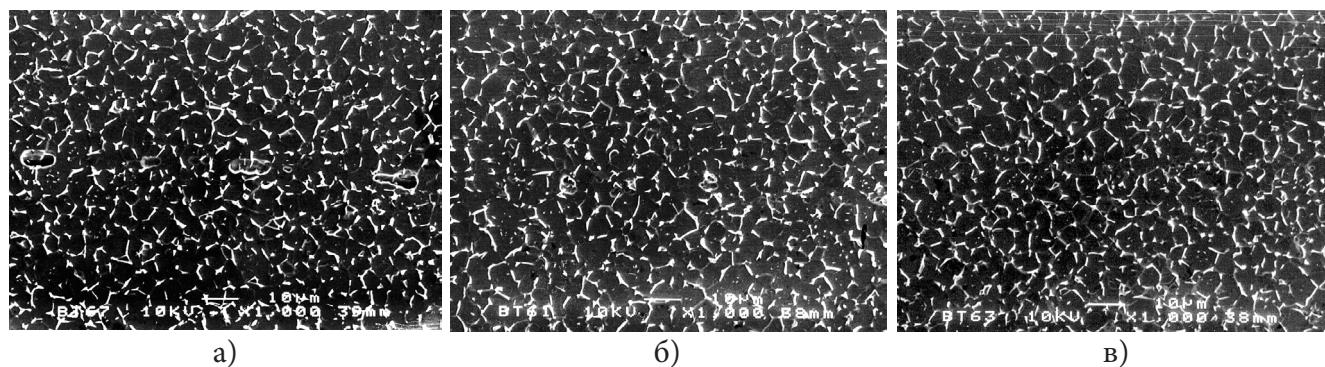


Рис. 1. Микроструктура соединения НС листовых заготовок сплава ВТ6, полученного при температуре 800°C и степени деформации  $\epsilon$ : а) – 1%; б) – 2%; в) – 3%.

ные поры, расположенные в основном на межфазных границах  $\alpha/\alpha$  (рис. 1, в).

В зоне соединения НС листовых заготовок, после СД при  $T = 750^\circ\text{C}$  и степени деформации  $\epsilon = 2\%$  преобладают дефекты первого типа. Они имеют форму узких и длинных несплошностей, ориентированных вдоль первоначальной плоскости контакта (рис. 2).

Результаты по СД при температурах 800 и  $750^\circ\text{C}$  показали, что если при  $T = 800^\circ\text{C}$  еще можно получить качественное соединение по традиционному режиму, увеличив степень деформации до 3%, то при  $T = 750^\circ\text{C}$  качество соединения невысокое, в зоне ТФС присутствуют не только поры но и непровары.

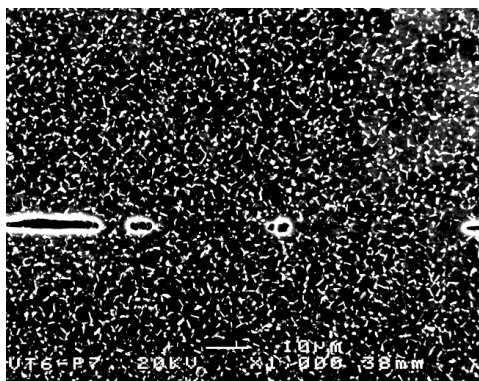


Рис. 2. Микроструктура соединения НС листовых заготовок сплава ВТ6, полученного при температуре  $750^\circ\text{C}$  и степени деформации  $\epsilon = 2\%$ .

Исследование влияния степени деформации на качество ТФС проводили на объемных образцах. Образцы с  $d = 200$  нм соединяли СД при температурах 600 и  $650^\circ\text{C}$ , с  $d = 400$  нм при температурах 700 и  $750^\circ\text{C}$ . Скорость деформации составляла  $7 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ . Результаты испытаний на растяжение при комнатной температуре сварных образцов сплава ВТ6 представлены в таблицах 1-4 [15,16].

Результаты механических испытаний показали, что качество ТФС при СД существенно зависит от степени деформации. При любой из рассмотренных температур сварки, с увеличением степени деформации прочностные свойства повышаются. При этом, чем ниже температура, тем больше значение имеет степень деформации, которая необходима для получения качественного соединения, которое имеет механические свойства на уровне основного материала.

Таблица 1

Механические свойства образцов, соединенных при  $T = 750^\circ\text{C}$ .

$(\epsilon), \%$	Механические свойства			
	$\sigma_b, \text{MPa}$	$\sigma_{0.2}, \text{MPa}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$
5	1021	1014	19,7	66,9
10	1023	1016	21,5	63,0
20	1000	990	19,9	53,8

Таблица 2

Механические свойства образцов, соединенных при  $T = 700^\circ\text{C}$ .

$(\epsilon), \%$	Механические свойства			
	$\sigma_b, \text{MPa}$	$\sigma_{0.2}, \text{MPa}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$
5	1054	1047	14,3	57,0
10	1052	1046	17,0	61,2
20	1020	1013	17,3	66,9

Таблица 3

Механические свойства образцов, соединенных при  $T = 650^\circ\text{C}$ .

$(\epsilon), \%$	Механические свойства			
	$\sigma_b, \text{MPa}$	$\sigma_{0.2}, \text{MPa}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$
10	-	-	-	-
20	1124	1061	2,7	4,3
25	1068	1025	13,3	24,8

Таблица 4

Механические свойства образцов, соединенных при  $T = 600^\circ\text{C}$ .

$(\epsilon), \%$	Механические свойства			
	$\sigma_b, \text{MPa}$	$\sigma_{0.2}, \text{MPa}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$
15	-	-	-	-
25	1156	1047	1,6	3,6
35	1149	1082	13,1	32,4

Следует отметить, что при понижении температуры СД до  $650^\circ\text{C}$  становится возможным не только повысить эффективность технологического процесса, но и сохранить размер зерен на уровне 1 мкм, как было показано в работе [17], и за счет этого повысить конструкционную прочность. Этого можно добиться путем увеличения степени деформации при СД, но такой подход, как



Таблица 5

Результаты механических испытаний ТФС листовых заготовок на сдвиг.

Температура СД, °С	Прочность ТФС на сдвиг $\tau$ , МПа	
	$d = 400$ нм	$d = 200$ нм
750	594,9	-
700	596,2	-
650	596,7	597,5
600	292,4	599,1
550	соединения нет	221,3

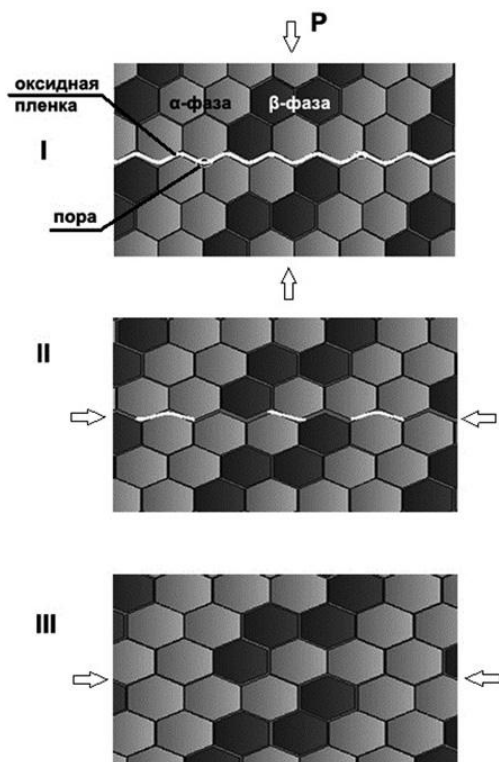


Рис. 3. Схема образования ТФС в условиях низкотемпературной сверхпластичности.

было уже отмечено, не всегда может быть реализован, особенно при изготовлении многослойных полых конструкций.

В экспериментах по СД листовых заготовок был применен прием, заключающийся в увеличении величины прикладываемой силы с помощью жесткого пуансона. СД листовых заготовок с  $d = 200$  нм осуществляли

Таблица 6

Рекомендуемые диапазоны значений давления для сварки НС титанового сплава ВТ6.

Температура, °С	Напряжение течения ( $\sigma_t$ ), МПа	Сварочное давление, МПа
900	12	(0,1- 0,2) $\sigma_t$
775	17	(0,2- 0,3) $\sigma_t$
700	45	(0,3- 0,4) $\sigma_t$
650	70	(0,4- 0,5) $\sigma_t$

при температуре 550°С в течение 120 мин, при 600°С - 60 мин, при 650°С - 30 мин. СД листовых заготовок с  $d = 400$  нм осуществляли при температуре 650°С в течение 60 мин, при 700°С - 45 мин, при 750°С - 30 мин.

Результаты механических испытаний ТФС листовых заготовок на сдвиг выявили зависимость сдвиговой прочности соединения ( $\tau$ ) от размера зерен при понижении температуры (табл. 5) [18].

При температуре 650°С ТФС листовых заготовок с  $d = 200$  нм за время 30 мин. имеет сдвиговую прочность, которую достигает ТФС листовых заготовок с размером зерен с  $d = 400$  нм за 60 мин.

Таким образом, при СД в условиях низкотемпературной сверхпластичности видна определяющая роль деформации при формировании ТФС

В работах [19,20], предложена схема образования ТФС в условиях низкотемпературной сверхпластичности (рис. 3).

Процесс образования ТФС в условиях низкотемпературной сверхпластичности предложено разделить на три этапа: I этап – образование физического контакта путем сближения соединяемых поверхностей под действием приложенной силы, которые разделяет тонкая оксидная пленка толщиной порядка 20 нм; II этап – разрыв (разрушение) оксидной пленки и «залечивание» микропор вследствие деформации путем ЗГП, которое приводит к активизации диффузионных процессов и растворению оксидной пленки главным образом по границам зерен; III этап – исчезновение плоской поверхности раздела и формирование произвольных границ зерен в зоне соединения за счет развития ЗГП.

Для СД в условиях низкотемпературной сверхпластичности необходимо скорректировать режим сварки, который применяется при высоких температурах. Отличие заключается в существенном повышении прикладываемой силы для соединения заготовок. Сварочное давление из диапазона (0,1-0,2)  $\sigma_t$  уже не достаточно, чтобы обеспечить качественное соединение.

Чем ниже температура СД тем выше должно быть сварочное давление относительно  $\sigma_t$  титанового сплава при этой же температуре. В таблице 6 приведены рекомендуемые диапазоны значений давления для сварки титанового сплава ВТ6 с размером зерен 200-400 нм при различных температурах.

#### 4. Заключение

1. При сварке давлением наноструктурного титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности чем ниже температура, тем выше должно быть значение давления относительно напряжения течения при этой температуре.

2. Установлено, что качество твердофазного соединения титанового сплава ВТ6 при сварке давлением в условиях низкотемпературной сверхпластичности зависит от степени деформации. При этом необходимая величина степени деформации увеличивается с понижением температуры.

## Литература

1. N.F. Kazakov. Diffusion Bonding in Vacuum. Moscow: Machine-Building (1968) 331 p. (in Russian) [Н.Ф. Казаков. Диффузионная сварка в вакууме. М: Машиностроение (1968) 331 с.].
2. Welding in Machine-Building. Hand-book. Ed. by N.A. Olshanski. Moscow: Machine-Building (1978) 504 p. (in Russian) [Сварка в машиностроении. Справочник. Под ред. Н.А. Олшанского. М.: Машиностроение (1978) 504 с.].
3. M.Kh. Shorshorov, E.M. Dzeladze, A.S. Tikhonov et al. Welding Production **11**, 20 (1975) (in Russian) [М.Х. Шоршоров, Е.М. Дзелядзе, А.С. Тихонов и др. Сварочное производство **11**, 20 (1975)].
4. O.A. Kaibyshev, R.Ya. Lutfullin, V.K. Berdin. Doklady Akademii Nauk SSSR **319**, 615 (1991) (in Russian) [О.А. Кайбышев, Р.Я. Лутфуллин, В.К. Бердин. Доклады академии наук СССР **319**, 615 (1991)].
5. O.A. Kaibyshev, R.Ya. Lutfullin, V.K. Berdin. The Physics of Metals and Metallography **75**, 96 (1993) [О.А. Кайбышев, Р.Я. Лутфуллин, В.К. Бердин. Физика металлов и металловедение **75**(1), 136 (1993)].
6. O.A. Kaibyshev, R.Ya. Lutfullin, V.K. Berdin. Acta Metall. Mater. **42**, 2609 (1994).
7. O.A. Kaibyshev. Plasticity and Superplasticity of Metals. Moscow: Metallurgiya (1975) 280 p. (in Russian) [О.А. Кайбышев. Пластичность и сверхпластичность металлов. М: Металлургия (1975) 280 с.].
8. D.M. Ward. Metals and Materials **2**, 9 (1986).
9. R.Ya. Lutfullin, O.A. Kaibyshev, O.R. Valiakhmetov, M.Kh. Mukhametrakhimov, R.V. Safiullin, R.R. Mulyukov. Journal of Advanced Materials **4**, 21 (2003) (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин, О.А. Кайбышев, О.Р. Валиахметов, М.Х. Мухаметрахимов, Р.В. Сафиуллин, Р.Р. Мулюков. Перспективные материалы **4**, 21 (2003)].
10. N.I. Noskova, R.R. Mulyukov. Submicrocrystalline and Nanocrystalline Metals and Alloys. Ekaterinburg UrD RAS (2003) 279 p. [Н.И. Носкова, Р.Р. Мулюков. Субмикрокристаллические и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург, УрО РАН (2003) 279 с.].
11. O.A. Kaibyshev, G.A. Salishchev, R.M. Galeev, R.Ya. Lutfullin, O.R. Valiakhmetov. Processing Method of Titanium Alloys. Russian Patent 2134308 (1999) (in Russian) [О.А. Кайбышев, Г.А. Салищев, Р.М. Галеев, Р.Я. Лутфуллин, О.Р. Валиахметов. Способ обработки титановых сплавов. Патент РФ № 2134308 (1999)].
12. V.V. Astanin. Vestnik USATU **2**, 34 (2002) (in Russian) [В.В. Астанин. Вестник УГАТУ **2**, 34 (2002)].
13. R.Z. Valiev, O.A. Kaibyshev, R.I. Kuznetsov, R.Sh. Musalimov, N.K. Tsenev. Doklady Akademii Nauk SSSR **301**, 864 (1988) (in Russian) [Р.З. Валиев, О.А. Кайбышев, Р.И. Кузнецов, Р.Ш. Мусалимов, Н.К. Ценев. Доклады АН СССР **301**, 864 (1988)].
14. R.Ya. Lutfullin. Letters on Materials **1**(1), 59 (2011) (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин. Письма о материалах **1**(1), 59 (2011)].
15. R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov. Journal of Advanced Materials **7**, 189 (2009) (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов. Перспективные материалы **7**, 189 (2009)].
16. M.Kh. Mukhametrakhimov. Rev. Adv. Mater. Sci. **25**(3), 273 (2010).
17. A.A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov, O.A. Rudenko, R.V. Safiullin. Journal of Advanced Materials **6**, 79 (2005) (in Russian) [А.А. Круглов, Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов, О.А. Руденко, Р.В. Сафиуллин. Перспективные материалы **6**, 79 (2005)].
18. R.Ya. Lutfullin, A.A. Kruglov, R.V. Safiullin, M.Kh. Mukhametrakhimov, O.A. Rudenko. Mater. Sci. Eng. **A503**, 52 (2009).
19. R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov. Rev. Adv. Mater. Sci. **25**(2), 142 (2010).
20. R.Ya. Lutfullin. Letters on Materials **1**(2), 88 (2011) (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин. Письма о материалах **1**(2), 88 (2011)].