

## РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ ЖИДКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

А.Г. Тягунов

С использованием результатов парного корреляционного анализа показана качественная оценка влияния химического состава жаропрочных никелевых сплавов на структурные изменения расплавов и параметры высокотемпературной обработки расплава.

*Ключевые слова:* жаропрочные никелевые расплавы, физические свойства, структура, расчетные показатели.

Современные жаропрочные сплавы представляют собой сложные композиции различных фаз, состоящих из 10 и более элементов. Базовой основой являются хромоникелевые растворы. Их упрочнение осуществляется путем введения легирующих элементов (вольфрама, молибдена, кобальта, ниобия и других), приводящих к искажению кристаллической решетки твердого раствора.

Однако в наибольшей степени повышение жаропрочности достигается при легировании титаном, алюминием и ниобием, способствующими созданию дисперсионной гетерогенной структуры, состоящей из  $\gamma$ -твердого раствора (матрица) и упрочняющей  $\gamma'$ -фазы  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb})$ .

Основная упрочняющая  $\gamma'$ -фаза выделяется как в дендритах  $\gamma$ -твердого раствора, так и в междендритном пространстве. Подобие решеток приводит к возникновению частично когерентной связи между выделениями  $\gamma'$ -фазы и матрицы. Помимо твердорастворного, приведенный дисперсионный механизм также является основным упрочнителем изделий.

Наличие в составе сплава углерода и азота также способствует созданию упрочняющих фаз, в число которых входят карбиды типа  $\text{MC}$ , карбонитриды на основе  $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})_x$  и хромистые карбиды на основе  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  и  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , легированные другими элементами. Влияние этих фаз при низких температурах (до 900 °С) незначительно, но при высоких температурах эксплуатации изделий (1000 °С и выше) их роль возрастает в связи с растворением при таких температурах основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы.

При затвердевании жаропрочных сплавов в последнюю очередь выделяется многофазная эвтектика. Легированность ее вольфрамом, молибденом, танталом, рением и другими элементами, обладающими высокой температурой плавления, способствует росту температуры солидус, а следовательно создает предпосылки к повышению эксплуатационных температур изделий.

К основным недостаткам жаропрочных сплавов относятся, прежде всего, потеря пластичности

при увеличении степени легированности, склонность к охрупчиванию при высоких температурах и длительных нагрузках, большие колебания значений длительной прочности, обусловленные неравномерным распределением элементов по объему матрицы и фаз. Отмеченные недостатки, как правило, связаны с дефектами исходного слитка и отливок и, как правило, не устраняются последующей обработкой.

С целью повышения качества литья в различных отраслях промышленности используется технология выплавки с термовременной обработкой расплава (ВТОР). Температурные и временные параметры такой технологии разрабатываются на основе анализа политерм физических свойств жидкого и показателей качества твердого металла [1].

Для жаропрочных сплавов наиболее информативными являются политермы удельного электросопротивления ( $\rho$ ). Используемая методика изучения  $\rho$  позволяет проследить характер изменения структуры сплавов до плавления, в процессе фазового перехода твердого металла в жидкое состояние и структурные особенности расплавов вплоть до 2000 °С. Как правило, данные по электросопротивлению хорошо коррелируют с характером изменения кинематической вязкости, поверхностного натяжения, плотности, магнитной восприимчивости и с результатами рентгеноструктурных исследований жидкого металла [1, 2].

Типичный вид зависимости  $\rho(t)$  жаропрочных сплавов приведен на рис. 1. При плавлении изменения в структуре сплава приводят к скачкообразному росту  $\rho$ . В процессе нагрева от температуры окончания плавления ( $t_n$ ) до температуры  $t_{ан}$  происходит плавное увеличение электросопротивления, обусловленное возрастанием амплитуды тепловых колебаний атомов и их рассеивающего фактора. Величина  $\Delta t_{ты} = t_{ан} - t_n$  характеризует термическую устойчивость первичной структуры расплава после плавления.

Резкое возрастание значений удельного электросопротивления происходит после достижения расплавом температуры  $t_{ан}$  (температуры анома-

лии), вплоть до температуры ветвления политерм (температуры гистерезиса  $t_r$ ). В интервале температур  $t_{ан}-t_r$  интенсивный рост  $\rho$  связан с переходом структуры расплава в равновесное состояние, соответствующее элементному составу сплава и сопровождаемое усилением межатомных связей. Однако только нагрев до критической температуры ( $t_k$ ) завершает перестройку структуры в равновесное состояние и устраняет возможность ее возврата в исходное состояние.

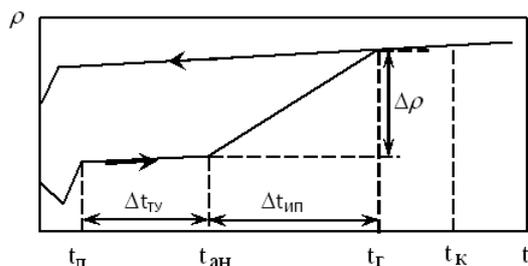


Рис. 1. Типичный вид температурной зависимости удельного электросопротивления жаропрочного сплава

Величина изменения электросопротивления в интервале температур  $t_{ан}-t_r$  может служить количественным показателем структурной перестройки в виде коэффициента интенсивности  $K_{ин} = \Delta\rho/\Delta t$ , где  $\Delta\rho$  есть разница между величинами  $\rho$  при  $t_{ан}$  на политермах охлаждения и нагрева, а  $\Delta t = t_r - t_{ан}$ .

Экспериментальные данные зависимости электросопротивления от температуры некоторых из изученных сплавов приведены на рис. 2. Из графиков видно, что структура каждого сплава обладает своими особенностями, выраженными через различия температур  $t_{ан}$ ,  $t_r$ ,  $t_k$ ; температурных интервалов  $t_{ан}-t_r$ ,  $t_r-t_{ан}$  и коэффициентов интенсивности изменения структуры расплавов.

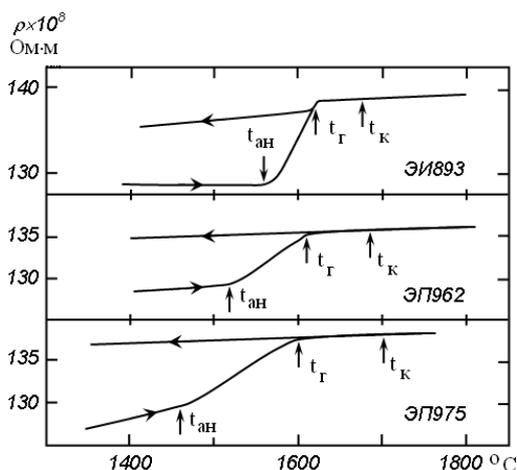


Рис. 2. Политермы удельного электросопротивления жаропрочных сплавов при нагреве и охлаждении

Полученные результаты используются при разработке режимов высокотемпературной обработки расплавов (ВТОР) [1, 2] и построении физи-

ческих моделей структурообразования сплавов. К сожалению, обсуждаемые параметры зависят не только от типа исходных шихтовых материалов, технологий плавки, разлива, кристаллизации, термической обработки и других металлургических факторов. Поэтому создание математических моделей и разработка полиномиальных уравнений, несомненно, имеют важное значение.

Результаты решения этих задач позволяют устранить зависимость разработчиков технологий на основе ВТОР от проведения непростых экспериментальных исследований, оценить вклад различных производственных факторов при помощи корреляционных коэффициентов и выделить из всей технологической цепочки изготовления изделий наиболее узкие места.

Совокупную сложность каждой задачи можно разделить на более простые этапы. В частности, представляется интересной известная методика парных корреляций. Такой подход позволит, как минимум, определить направление влияния различных факторов на обсуждаемые параметры. Например, анализируя результаты экспериментальных исследований жаропрочных сплавов, содержащих в своем составе 0,002–0,200 мас. % С, удалось установить зависимость аномальных температур ( $t_{ан}$ ) и температур гистерезиса ( $t_r$ ) от концентрации углерода (рис. 3).

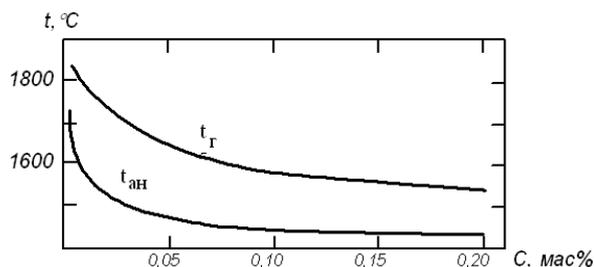


Рис. 3. Зависимость аномальных температур ( $t_{ан}$ ) и температур гистерезиса ( $t_r$ ) политерм удельного электросопротивления жаропрочных сплавов от концентрации углерода

Причем наиболее значительное влияние этого фактора наблюдается для сплавов, содержащих до 0,05 мас. % С. Поэтому для дальнейшего корреляционного анализа из 42 изученных жаропрочных сплавов использовали данные только по 14 сплавам, имеющим концентрацию углерода в интервале 0,60–0,75 ат. %. Содержание контролируемых элементов приведено в табл. 1, а изменение величин характеристических температур приведено в табл. 2.

Проведенный парный корреляционный анализ основан на предположении о существовании некоторой функциональной зависимости характерных температур и температурных интервалов, отраженных на политермах электросопротивления (см. рис. 1), а также коэффициента интенсивности изменений структуры сплавов ( $K_{ин}$ ). В качестве аргументов использовали следующие:

Таблица 1

## Химический состав исследованных жаропрочных сплавов и величины их характеристических температур

Сплав	Химический состав, ат. %													
	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	B	V	Fe	Ta	Re	Zr
ЭП962	0,60	13,0	10,5	3,2	0,6	6,2	3,2	2,2	0,05	–	–	–	–	–
ЭП975	0,65	8,3	15,0	0,8	3,0	2,7	–	0,9	0,1	–	–	–	–	–
X6H60K8BЮТМБФ	0,70	6,2	7,6	0,65	4,0	8,7	1,1	0,9	–	1,44	–	–	–	–
X9H61K9BЮТМБФ	0,75	9,0	9,0	1,4	2,9	9,9	2,5	0,8	0,18	–	–	–	–	–
X6H63K8BЮТМБФ	0,70	6,0	7,6	0,65	3,7	10,2	1,3	0,9	–	1,3	–	–	–	–
X6H64K7BЮТМБФ	0,70	5,5	6,9	0,60	3,8	11,3	1,3	0,9	–	1,3	–	–	–	–
X5H65K9BЮТМБФ	0,68	5,0	9,0	0,8	3,2	9,9	1,3	0,9	0,07	–	–	–	–	–
X5H66K6BЮТМБФ	0,70	5,0	6,0	0,6	3,4	10,2	1,1	0,9	–	1,2	–	–	–	–
X5H67K7BЮТМБФ	0,70	4,8	6,6	0,6	3,3	11,7	1,3	0,9	–	1,2	–	–	–	–
X8H71K9BЮТМБФ	0,70	7,3	8,4	0,65	4,1	8,6	1,1	0,9	–	–	–	–	–	–
ЖС6У	0,75	8,7	9,8	1,4	3,0	11,3	3,0	0,6	–	–	–	–	–	–
ЖС6Ф	0,70	5,5	9,5	0,7	3,7	11,3	1,5	0,9	–	–	–	–	–	–
ЖС32	0,70	5,0	9,0	0,7	2,5	12,3	–	0,9	0,01	–	1,0	1,0	1,0	0,06
ЖС26	0,70	5,0	9,0	0,8	3,7	10,2	1,3	0,9	–	–	–	–	2,0	–

Таблица 2

## Величины характеристических температур исследованных жаропрочных сплавов

Сплав	Характеристические температуры, °С			
	$t_{\text{л}}$	$t_{\text{ан}}$	$t_{\text{г}}$	$t_{\text{к}}$
ЭП962	1390	1520	1610	1680
ЭП975	1340	1470	1600	1720
X6H60K8BЮТМБФ	1420	1500	1620	1680
X9H61K9BЮТМБФ	1360	1610	1700	1740
X6H63K8BЮТМБФ	1420	1530	1640	1700
X6H64K7BЮТМБФ	1410	1470	1610	1650
X5H65K9BЮТМБФ	1390	1580	1630	1700
X5H66K6BЮТМБФ	1410	1500	1650	1700
X5H67K7BЮТМБФ	1400	1520	1660	1700
X8H71K9BЮТМБФ	1370	1500	1660	1720
ЖС6У	1370	1470	1590	1710
ЖС6Ф	1380	1470	1570	1700
ЖС32	1380	1480	1650	1680
ЖС26	1390	1470	1620	1680

• общее содержание легирующих элементов ( $\Sigma$ ) в виде коэффициента

$$K_1 = \Sigma \alpha_{1-n};$$

• сумму элементов, упрочняющих хромоникелевый раствор

$$K_2 = \text{Co} + \text{W} + \text{Mo} + \text{Fe} + \text{V} + 1/2\text{Nb};$$

• суммарное содержание элементов образующих  $\gamma'$ -фазу

$$K_3 = \text{Al} + \text{Ti} + 1/2\text{Nb};$$

• суммарную концентрацию карбидообразующих элементов

$$K_4 = \text{Cr} + \text{Fe} + \text{W} + \text{Mo} + \text{V} + \text{Ti};$$

• величины отношений

$$\frac{\text{Cr}}{\text{Ni}}, \frac{K_1}{\text{Ni} + \text{Cr}}, \frac{K_2}{\text{Ni} + \text{Cr}}, \frac{K_3}{\text{Ni}}, \frac{\text{C}}{K_4}, \frac{\text{Ti}}{\text{Al}}$$

Из представленных на рис. 4 графических зависимостей следует: температуры аномалий и гис-

терезиса уменьшаются с ростом коэффициентов

$K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ , отношений  $\frac{\text{Cr}}{\text{Ni}}$ ,  $\frac{K_1}{\text{Ni} + \text{Cr}}$ ,  $\frac{K_2}{\text{Ni} + \text{Cr}}$ ,  $\frac{K_3}{\text{Ni}}$  и

только один фактор, а именно рост величины отношения концентрации углерода к суммарному содержанию карбидообразующих элементов способствует повышению  $t_{\text{ан}}$  и  $t_{\text{г}}$ .

Разнонаправленное действие оказывает увеличение отношения концентраций  $\text{Ti}/\text{Al}$ . При этом температуры  $t_{\text{ан}}$  и  $t_{\text{г}}$  незначительно снижаются,  $t_{\text{к}}$  интенсивно возрастает. Например, отношение  $\text{Ti}/\text{Al}$  изменяется от 0,11 до 0,15, а  $t_{\text{к}}$  возрастает с 1670 до 1740 °С. К сожалению, количество обработанных данных по 14 сплавам оказалось недостаточным для конкретных выводов относительно роли факторов в формировании уровня критических температур.

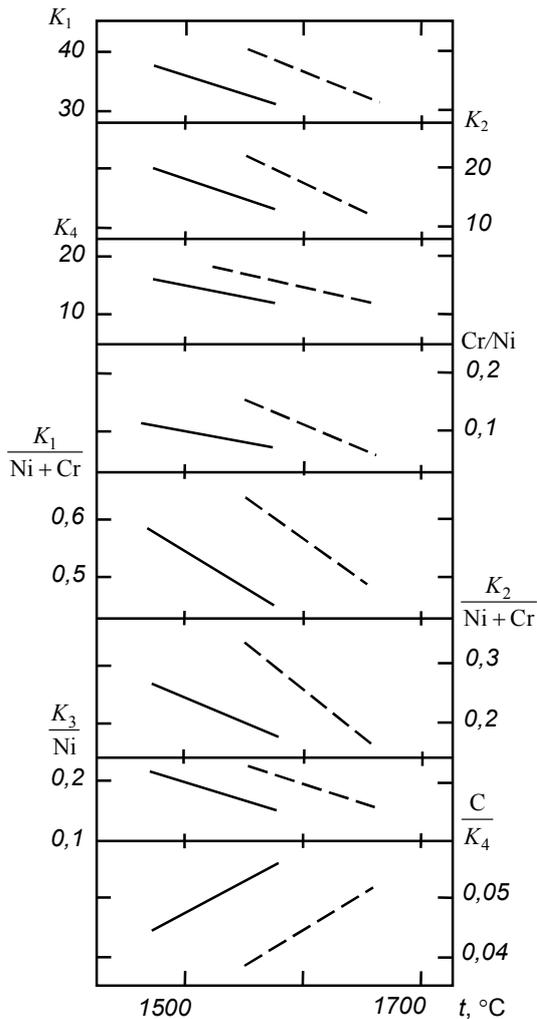


Рис. 4. Влияние различных факторов на величину и характер изменения аномальных температур ( $t_{ан}$ , сплошная линия) и температур гистерезиса ( $t_r$ , пунктирная линия)

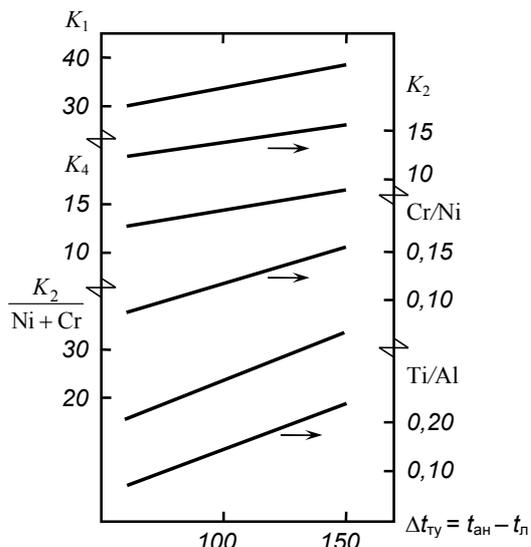


Рис. 5. Влияние различных факторов на величину и характер изменения интервала температур термической устойчивости ( $\Delta t_{ty}$ ) структуры жаропрочных сплавов после плавления

Таким образом, изменение концентрации углерода и легирующих элементов в составе жаропрочных сплавов оказывает влияние на величину аномальных температур и температур гистерезиса. Такая информация по каждому сплаву, несомненно, позволит расширить возможности технологии ВТОР при выплавке и переплаве жаропрочных сплавов.

Влияние различных факторов на величину температурного интервала термической устойчивости ( $\Delta t_{ty} = t_{ан} - t_n$ ) первичной структуры жидкого металла, образующейся после плавления шихты, показано на рис. 5. Их рост способствует увеличению значений  $\Delta t_{ty}$ . Отсутствие на рис. 5 таких аргументов, как суммарное содержание элементов, образующих  $\gamma'$ -фазу, и отношения концентрации углерода к коэффициенту  $K_4$ , связано с малой значимостью.

Более сложным (рис. 6) оказалось влияние рассматриваемых факторов на величину температурного интервала интенсивной перестройки структуры жидких жаропрочных сплавов в равновесное состояние ( $\Delta t_{ин} = t_r - t_{ан}$ ). Величина этого интервала возрастает, если уменьшается объем легирующих элементов ( $K_1$ ), снижается концентрация хрома в отношении  $Cr/Ni$  при сравнительно близких содержаниях никеля в изученных сплавах, а также уменьшается отношение  $Ti/Al$ . Обратное действие оказывает уменьшение коэффициента  $K_2$  и отношения  $\frac{K_2}{Ni + Cr}$ .

Коэффициент  $K_{ин} = \frac{\Delta \rho}{\Delta t_{ин}}$ , отражающий в оп-

ределенной степени скорость процесса перехода структуры расплава в равновесное состояние, повышается с уменьшением величины различных

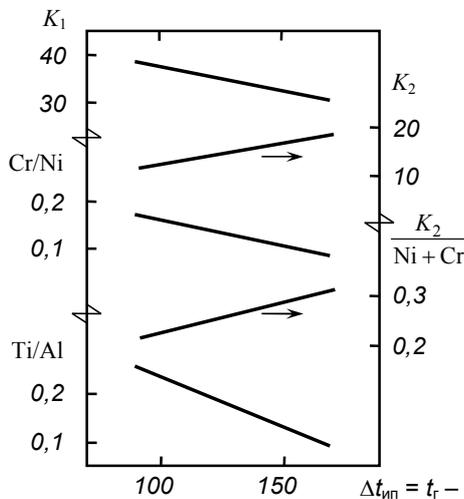


Рис. 6. Влияние различных факторов на величину и характер изменения температурного интервала интенсивной перестройки ( $\Delta t_{ин}$ ) структуры жидких жаропрочных сплавов

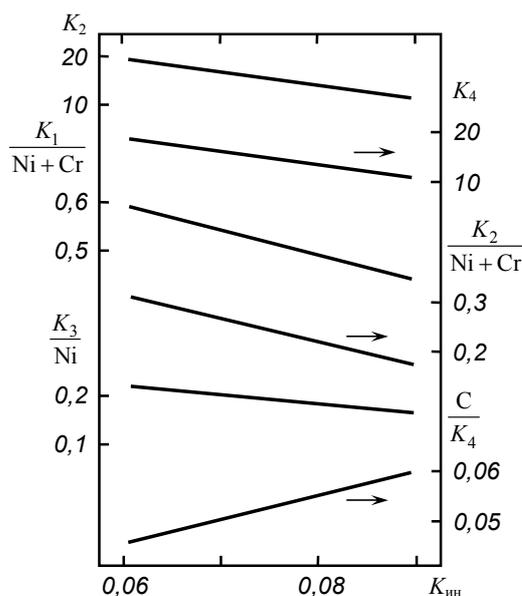


Рис. 7. Влияние различных факторов на величину коэффициента интенсивности перестройки ( $K_{инт} = \Delta\rho/\Delta t_{инт}$ ) структуры жидких жаропрочных сплавов

факторов (рис. 7). Исключением является отношение концентрации углерода к суммарному содержанию карбидообразующих элементов  $C/K_4$ . Принимая во внимание практически отсутствующую

ее влияние углерода на температуры  $t_{ан}$  и  $t_r$  (см. рис. 3) в интервале его концентрации в изученных сплавах (0,12–0,16 мас. %), отметим, что основную роль в изменении  $K_{инт}$  играет интервал  $\Delta t_{инт}$ , который понижается с увеличением таких факторов, как  $K_1$ ,  $Cr/Ni$ ,  $Ti/Al$  и уменьшением  $K_2$  и

$\frac{K_2}{Ni+Cr}$  (см. рис. 6).

Таким образом, используя результаты парного корреляционного анализа, удастся лишь качественно оценить влияние химического состава жаропрочных никелевых сплавов на параметры высокотемпературной обработки расплава. Поэтому основным способом научного обоснования технологических режимов ВТО является сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований структуры и свойств металла в жидком и твердом состояниях.

#### Литература

1. Жидкая сталь / Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов и др. – М.: Металлургия. – 1984. – 208 с.
2. Барышев, Е.Е. Влияние структуры расплава на свойства жаропрочных никелевых сплавов в твердом состоянии / Е.Е. Барышев, А.Г. Тягунов, Н.Н. Степанова. – Екатеринбург: НИСО УрО РАН, 2010. – 198 с.

**Тягунов Андрей Геннадьевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник исследовательского центра физики металлических жидкостей, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: adi8@yandex.ru.

*Bulletin of the South Ural State University  
Series "Metallurgy"  
2013, vol. 13, no. 1, pp. 74–78*

## DEVELOPMENT OF HIGH-TEMPERATURE TREATMENT REGIMES OF LIQUID NICKEL-BASE SUPERALLOYS ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL AND CALCULATED INDICATORS

**A.G. Tyagunov**

The paper shows a qualitative evaluation of the influence of chemical composition of nickel-base superalloys on structural changes of the melt and parameters of high-temperature treatments of the melt using the results of pair correlation analysis.

*Keywords: nickel-base superalloy melts, physical properties, structure, calculated indicators.*

**Tyagunov Andrey Gennad'evich**, candidate of engineering science, senior researcher of the Research Centre for Metal Liquid Physics, Ural Federal University Named After the First President of Russia B.N. Yeltsin. 19 Mira street, Ekaterinburg, Russia 620002. E-mail: adi8@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 9 марта 2013 г.*