

## Научные основы технологии получения и обработки наноструктурированных металлов и сплавов

Ф. З. Утяшев<sup>1†</sup>, Ш. Х. Мухтаров<sup>1</sup>, Р. Ю. Сухоруков<sup>2</sup>

<sup>†</sup>ufz1947@mail.ru

<sup>1</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, Уфа, 450001, Россия

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Малый Харитоньевский переулок 4, Москва, 101990, Россия

Современные жаропрочные никелевые сплавы, применяемые в авиадвигателестроении, представляют собой наноструктурные материалы. Содержание в этих сплавах большого количества наноразмерных интерметаллидных частиц обуславливают их высокую прочность и жаропрочность, но создает большие трудности при обработке давлением. В статье рассматриваются различные методы формообразования осесимметричных деталей ротора газотурбинных двигателей (ГТД), таких как диски и валы из жаропрочных никелевых сплавов. Например, процесс раскатки диска осуществляют в условиях сверхпластичности за один переход с большим обжатием заготовок по толщине. Применение другой схемы позволяет раскатывать разнообразие валов, включая длинномерные и их комбинации с диском. Показано, что ротационный метод формообразования дисков - раскатка отличается высоким значением поворотной моды деформации. Метод раскатки обеспечивает большую деформационную проработку материала заготовки, вследствие которой получается однородная УМЗ структура, что важно для достижения высоких и изотропных механических свойств. Важным преимуществом раскатки является то, что накопление большой деформации в этом методе происходит за счет ротационной компоненты, которая не изменяет размеров заготовки. В зависимости от температуры эксплуатации сплавы с УМЗ структурой могут применяться непосредственно после формообразования или с дополнительной термообработкой. Так, при испытании на длительную прочность образец из высоколегированного сплава ЭП962 с УМЗ структурой при температуре 500°C и нагрузке 1050 МПа выдержал без разрушения свыше 3000 часов. Между тем, обычно такие испытания прекращают, если образец простоял 100 часов. При комнатной температуре этот сплав с УМЗ структурой показал высокую прочность до разрушения - 1600 МПа. Другой жаропрочный сплав Inconel 718 в УМЗ состоянии демонстрирует прочность свыше 2000 МПа, а также высокую усталостную прочность.

**Ключевые слова:** жаропрочные сплавы, ультрамелкозернистая структура, раскатка

## Scientific bases of formation technology and processing of nanostructured metals and alloys

F. Z. Utyashev<sup>1</sup>, Sh. Kh. Mukhtarov<sup>1</sup>, R. Yu. Sukhorukov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, 39 Khalturin St., Ufa, 450001, Russia

<sup>2</sup>A. Blagonravov Institute of Machines Science of the RAS, 4 Maly Kharitonievskiy Pereulok, Moscow, 101990, Russia

The modern nickel based superalloys for aircraft engine applications are nanostructured materials. A large number of intermetallic nanosized particles in these alloys provide them high strength and heat resistance, but cause great difficulties for processing. The article discusses various methods of forming axisymmetric parts for rotors of gas turbine engines such as discs and shafts out of nickel based superalloys. The superplastic process of roll-forming the disc is carried out at one passage with a large cogging of blanks in thickness, for example. A variety of hollow shafts can be roll-formed using a different scheme, which allows making long shafts and their combination with the disc. It is shown that the rotary method of disc forming - roll-forming has a high value of the rotary mode of deformation. The roll-forming method provides large strain of the workpiece material, which is obtained as a result of the fine-grained homogeneous structure, which is important to achieve high and isotropic mechanical properties. An important advantage of roll-forming is that the accumulation of large strain in this method is due to rotational components, which does not change the size of the workpiece. Fine-grained alloys, depending on the operating temperature, can be used directly after roll-forming or additional heat treatment. Long-term strength at 500°C and a load of 1050 MPa of a sample out of superalloy EP962 with fine-grained structure survived without failure more than 3,000 hours. Meanwhile, typically such test is provided for 100 hours only. This fine-grained alloy

showed a high strength of about 1600 MPa at room temperature. Another fine-grained superalloy Inconel 718 revealed strength over 2000 MPa, and high fatigue strength.

**Keywords:** heat-resistant alloys, ultrafine-grained structure, roll-forming

## Введение

Известно, что наиболее высокую длительную прочность при высоких температурах эксплуатации в жаропрочных никелевых сплавах (ЖНС) обеспечивает крупнозернистая структура матрицы с большим количеством когерентных интерметаллидных наноразмерных выделений [1]. Такая структура формируется уже в результате кристаллизации сплавов. Однако в отливках больших размеров, используемых для изготовления деталей газотурбинных двигателей (ГТД), жаропрочные сплавы имеют крайне неоднородные химический, фазовый состав и зеренное строение, что не позволяет достигать необходимых эксплуатационных свойств. Необходимую структуру и механические свойства ЖНС обеспечивает большая однородная деформация. Реализовать такой процесс, используя обычную ковку, практически невозможно. Необходимый результат обеспечивает процесс Gatorizing™ [2], включающий в себя прессование крупногабаритных слитков или порошковых заготовок с последующей штамповкой деталей в условиях сверхпластичности. На российских предприятиях дорогостоящее оборудование и оснастка, необходимые для процесса Gatorizing, отсутствует. Диски ГТД изготавливают методом горячего изостатического прессования (ГИП) гранул без применения больших деформаций, что не позволяет реализовать в ЖНС максимально возможные механические свойства. Альтернативным рассмотренным методам является метод раскатки дисков в условиях сверхпластичности.

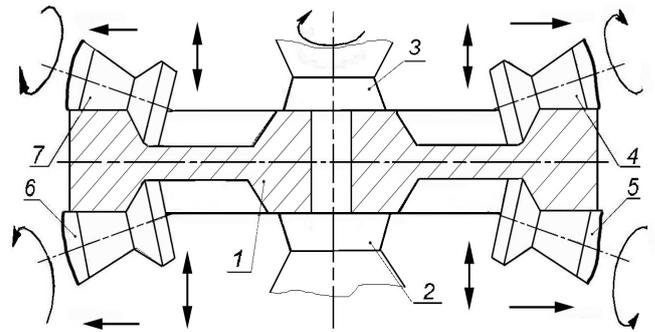
В данной работе приводятся принципиальные схемы формообразования деталей посредством раскатки. Рассматриваются условия, позволяющие управлять структурообразованием в ЖНС при обработке, в частности, накапливать большие деформации, обеспечивающие формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в ЖНС. Наличие такой структуры обеспечивает не только возможность использования сверхпластической деформации (СПД) при формообразовании деталей, но и необходимые служебные свойства в случаях эксплуатации при температурах не выше 500°C, характерных для валов и дисков компрессора ГТД.

## Результаты исследования и обсуждение

### Схемы раскатки деталей ротора ГТД

Процесс раскатки осесимметричных деталей — дисков и валов осуществляют в условиях сверхпластичности. В таких условиях, как показано в работе [3], можно варьировать термомеханические параметры в локализованном очаге деформации и, таким образом, обеспечивать

формирование либо однородной во всем объеме диска структуры, либо регламентированно изменяющейся (градиентной) структуры. Последняя важна для дисков большого диаметра, у которых ступица при эксплуатации нагревается до значительно более низкой температуры, чем обод. Принципиальная схема раскатки диска приведена на рис.1. Нагретая до температуры деформации заготовка 1 приводится во вращение пинолями 2 и 3. Под воздействием одной или двух пар вращающихся роликов 4, 5 и 6, 7, имеющих возможность перемещаться в осевом и радиальном направлениях, а также менять угол наклона по отношению к плоскости раскатки, заготовка деформируется с уменьшением толщины и с увеличением диаметра.

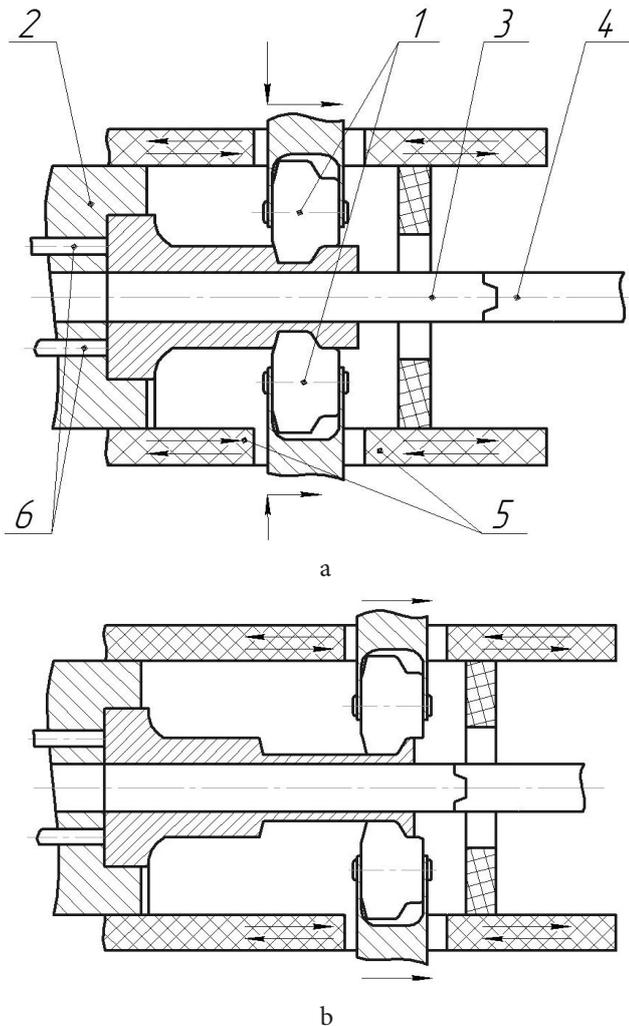


**Рис. 1.** Принципиальная схема раскатки дисков: 1- раскатываемый диск; 2, 3 - пиноли; 4 - 7 - наклонные ролики.

**Fig. 1.** Principal schema of roll-forming: 1- roll-formed disc; 2, 3 - quills; 4 - 7 - rolls.

Важной особенностью этой схемы является то, что раскатка осуществляется под воздействием индивидуальных моментов на каждом ролике и на заготовке. Это позволяет осуществлять формообразование дисков за один переход с большим обжатием заготовок по толщине и с применением защитно-смазочного покрытия.

Для получения валов ГТД целесообразно использовать схему, показанную на рис.2. Особенностью этой схемы является использование двух роликовых головок, расположенных оппозиционно, что позволяет уравновесить поперечные силы и повысить производительность раскатки. В соответствии с выбранной схемой, перемещение инструмента и вытяжка заготовки вследствие раскатки происходят в одном направлении, что позволяет использовать печь с ограниченными по длине размерами, так как по мере удлинения раскатанная часть заготовки выходит из печи. Такая схема позволяет раскатывать разнообразные валы, включая длинномерные валы и их комбинации с диском.



**Рис. 2.** Схема раскатки вала в условиях сверхпластичности: 1 — ролики; 2 — шпиндель; 3 — оправка; 4 — пиноль задней бабки; 5 — подвижные створки печи; 6 — выталкиватель; (а) внедрение роликов; (б) — завершение первого прохода.

**Fig. 2.** Superplastic roll-forming schema of hollow shaft: 1- rolls; 2 — spindle; 3 — mandrel; 4 — tailstock quill; 5 — leaf; 6 — extractor; (a) rollers insertion; (b) the end of the first pass.

### Структурное и деформированное состояние сплавов

Существенной особенностью метода раскатки, отличающего его от других методов обработки металлов давлением (ОМД), является то, что большая роль в структурообразовании в нем отводится ротационной (поворотной) моде деформации. Поскольку в теории ОМД наличие поворотной деформации обычно лишь упоминают [4], но практически не учитывают, то далее остановимся на важной роли этой деформации для структурообразования в таких деталях ответственного назначения, как детали ротора ГТД.

**Структурное состояние.** На примере металлов и однофазных сплавов<sup>1</sup> было выявлено [5], что размер зерен после деформации в этих материалах определяется

<sup>1</sup> В качестве однофазной матричной основы ЖНС можно рассмотреть никель и его сплав с хромом.

средним размером ячеек, границы которых являются траекториями перемещения диполей частичных дисклиниаций. В результате перемещения этих дефектов формируются микрополосы с большеугловыми границами. Пересечение микрополос, вследствие немонотонности (разнонаправленности) деформации приводит к формированию мелких зерен. Поскольку границы ячеек представляют собой плотные скопления зарядовых дислокаций, искривляющих и закручивающих кристаллическую решетку материала, то радиус кривизны  $R$  и, следовательно, средний диаметр ячеек, равный  $d=2R$ , можно определить, используя формулу:

$$R = \theta / \beta_{\Sigma}, \quad (1)$$

где  $\beta_{\Sigma}$  — накопленная тензорная плотность дислокаций, которая представляет собой меру кривизны-закрутки кристаллической решетки:

$$\beta_{\Sigma} = \int_0^{\varepsilon} b \rho' d\varepsilon = (k_0) \int_0^{\varepsilon} \{ \exp[0,5\varepsilon \exp(-3\varepsilon/2)] - 1 \} d\varepsilon, \quad (2)$$

Тензорная плотность дислокаций возрастает с увеличением степени деформации  $\varepsilon$  и коэффициента  $k=A/V$ , где  $A$  — площадь поверхности макроочага деформации,  $V$  — объем макроочага деформации [5]. Отметим, что в однофазных материалах  $k \approx 1R$ , где  $R$  — поперечный размер заготовки. В многофазных сплавах, включая ЖНС, макроочаг деформации разбивается на множество «самостоятельных» микроочагов, ограниченных межчастичными расстояниями, поскольку присутствие частиц затрудняет релаксационные перестройки решеточных дислокаций в пределах всего макроочага деформации, как единого целого. Вследствие этого в ЖНС при прочих равных условиях обработки (температуры и степени деформации) значения  $k$  и  $\beta_{\Sigma}$  повышаются, а размер измельченных зерен уменьшается по сравнению с однофазными материалами. Аналогичное влияние частиц на размер зерен следует и из соотношения Зинера-Смита в отношении динамической рекристаллизации.

**Деформированное состояние (ДС).** Оценим ДС по степени деформации, накапливаемой в заготовке при раскатке на примере диска [6] и вала. Пусть при раскатке диска диаметр заготовки увеличился с  $d$  до  $D$ . Если, как принято в ОМД, учитывать лишь формоизменяющую деформацию, то среднюю степень деформации можно определить по формуле:

$$\varepsilon = \int_{t_0}^t \xi_e dt = \int_{L_0}^L \frac{V}{L} dt, \quad (4)$$

где  $\xi_e$  — интенсивность скорости деформации,  $t_0$  и  $t$  — соответственно начальное и конечное время раскатки,  $L_0$  и  $L$  — начальная и конечная точка перемещения материальной точки по спирали,  $V=dL/dt$  — скорость перемещения материальной точки по спирали.

С целью упрощения вычисления степени деформации заменим сложное натуральное уравнение спирали Архимеда уравнением эвольвенты круга, которая уже на первом витке с точностью до 1% совпадает со спиралью Архимеда. Натуральное уравнение эвольвенты име-

ет вид:  $L=R\varphi^2/2$ , где  $R$  — расстояние от центра заготовки (радиус), на котором начинается раскатка. В результате относительная скорость:

$$V = \frac{dL}{dt} = \frac{\varphi^2}{2} \frac{dR}{dt} + R\varphi \frac{d\varphi}{dt}. \quad (5)$$

Накопленная вдоль траектории деформация:

$$\varepsilon = \int_{d/2}^{D/2} \frac{dR}{R} + 2 \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} \frac{d\varphi}{\varphi} = \ln \frac{D}{d} + 2 \ln \frac{n_k}{n_0} \quad (6)$$

где  $\varphi_k$  — полный угол закрутки эвольвенты,  $\varphi_k = 2\pi n_k$ ;  $n_k$  — число оборотов заготовки при раскатке;  $\varphi_0 = 2\pi n_0$  и  $n_0$  — соответственно начальный угол и первый оборот заготовки.

Первый интеграл в выражении (4) учитывает вклад в степень деформации тензора деформации, а второй интеграл — вклад тензора поворота. Диаметр заготовки при раскатке увеличивается в 1,5÷2 раза, при этом заготовка совершает от 50 до 150 оборотов. Соответственно степень формообразующей деформации, вычисленной по формуле (2), составит  $e \approx 0,4 \div 0,5$ , а по формуле (4), учитывающей поворотную компоненту (ротационную моду), на порядок больше —  $e \approx 4 \div 5$ .

При раскатке вала пятно контакта перемещается по винтовой линии. Длина винтовой линии:

$$L = \sqrt{a^2 + b^2} \omega t. \quad (7)$$

На стационарной стадии раскатки, т.е. при  $a=const$ ,  $b=const$  для накопленной деформации с учетом ротационной составляющей получим:

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \int_{\varphi_0}^{\varphi} \frac{d(\sqrt{a^2 + b^2} \omega t)}{\sqrt{a^2 + b^2} \omega t} = \int_{t_0}^t \frac{dt}{t} = \ln t - \ln t_0 \quad (8)$$

В уравнении (8) пределы интегрирования выбраны аналогично уравнению (6).

Согласно принципу Сен-Венана, распределение напряжений в материале при неравномерной нагрузке — воздействию на поверхность локального очага деформации выравнивается на определенном расстоянии от поверхности. Например, известно, что в цилиндрических образцах для растяжения выравнивание напряжений происходит на расстоянии, равном пяти диаметрам образца в растягиваемой части. Кроме того согласно теоретическим расчетам Ламе, при нагружении массивных тел (например, толстостенного сосуда) напряжение в стенке сосуда существенно спадает на расстоянии свыше 2,9 радиуса от его внутреннего радиуса. Поэтому с допустимой точностью можно принять, что после трех — четырех оборотов заготовки все материальные точки, изначально расположенные на поверхности контакта очага деформации с инструментом, успевают переместиться в раскатанную часть вала. При этом, поскольку в раскатанной части действуют существенно меньшие напряжения, чем непосредственно в зоне контакта заготовки с инструментом, то можно принять, что внеконтактные напряжения не вызывают деформации

раскатанной части. Из этих предположений степень деформации составит  $\varepsilon \approx \ln(3 \div 4) \approx 1 \div 1,4$ .

Таким образом, полученные оценки pokыывают, что метод раскатки обеспечивает большую деформационную проработку материала заготовки, вследствие которой получается весьма однородная по химическому, зеренному и фазовому строению УМЗ структура, что важно для достижения высоких и изотропных механических свойств [1,7]. Важным преимуществом раскатки является то, что накопление большой деформации в этом методе происходит за счет ротационной компоненты, которая сама по себе не изменяет размеров заготовки. Между тем, например, при прессовании, такая же деформация приводит к редукции поперечного сечения прутка, что ограничивает возможность его использования для изготовления деталей большого диаметра.

### Особенности раскатки деталей в условиях сверхпластичности

Традиционно в ГТД используют диски с однородной макро- и микроструктурой, поскольку в них нет концентраторов напряжений, характерных для разнотекстурных структур. Формирование однородной структуры в диске обеспечивает раскатка в состоянии сверхпластичности материала диска. Основным механизмом при такой деформации является зернограничное проскальзывание, следствием которого является высокая стабильность мелких зерен, отсутствие текстуры, химическая и фазовая однородность сплава независимо от распределения деформации, обусловленного геометрией диска. Немаловажной особенностью, диска раскатанного в условиях сверхпластичности, является низкая плотность дислокаций и, следовательно, незначительный уровень внутренних напряжений, характерных для сплавов в хорошо отожженном состоянии. Эта особенность наряду с другими положительными свойствами сверхпластической деформации повышает химическую, фазовую однородность УМЗ структуры.

В зависимости от температуры эксплуатации сплавы с УМЗ структурой могут применяться непосредственно после формообразования или с дополнительной термообработкой. Так, при испытании на длительную прочность образец из высоколегированного сплава ЭП962 с УМЗ структурой при температуре 500°C и нагрузке 1050 МПа выдержал без разрушения свыше 3580 часов. Между тем, обычно такие испытания прекращают, если образец простоял 100 часов. При комнатной температуре этот сплав с УМЗ структурой показал высокую прочность до разрушения — 1600 МПа. Другой жаропрочный сплав Inconel 718 в УМЗ состоянии демонстрирует прочность свыше 2000 МПа, а также высокую усталостную прочность [8].

Такие свойства позволяют использовать эти сплавы при умеренных температурах нагрева деталей в определенных частях конструкции ГТД, например, для валов.

В случае использования ЖНС для изготовления деталей, работающих при более высоких температурах (600–750°C), после раскатки необходимо выполнять термообработку с нагревом в однофазную область и ста-

рением, что позволяет сформировать в них достаточные для указанных температур жаропрочные свойства, за счет укрупнения зерен матрицы и равномерного выделения в их объеме наноразмерных частиц интерметаллидной фазы.

### Заключение

В работе показано, что ротационный метод формования дисков — раскатка отличается высоким значением поворотной моды деформации, что обеспечивает существенную деформационную проработку ЖНС, необходимую для формирования в таких деталях ротора ГТД, как диски и валы, однородной структуры с высокими и изотропными механическими свойствами.

Раскатка в условиях сверхпластичности позволяет контролировать термомеханические режимы деформации дисков, обеспечивающие формирование в них однородной структуры с высоким комплексом эксплуатационных свойств при умеренных температурах, как непосредственно после формообразования, так и после дополнительной термообработки с целью их эксплуатации при высоких температурах.

Отмеченные достоинства раскатки в сочетании с другими преимуществами: универсальностью, высоким коэффициентом использования металла, малым усилием деформации и стоимостью инструмента, обеспечивают возможность изготовления широкой номенклатуры высококачественных дисков ГТД. Широкие возможности процесса раскатки достигаются благодаря тому, что раскатные станы выполняются по такому же принципу, как металлорежущие обрабатывающие центры, используемые в современных гибких производствах. Подобно центрам, раскатные станы оснащены большим количеством приводов, необходимых для многокоординатных перемещений деформирующих роликов, системами нагрева и охлаждения заготовки и инструмента, а также многоуровневой системой компьютерного управления процессом изготовления дисков в автоматическом режиме.

*Благодарность.* Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» (соглашение № 14.604.21.0091 от 08.07.2014, уникальный идентификатор проекта при-

кладных научных исследований — RFMEFI60414X0091).

*Acknowledgements.* The work was carried out with financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Target Program “Investigation and Development in Focal Areas of the Research and Technology Center of Russia for 2014-2020” (Agreement No. 14.604.21.0091, unique identifier RFMEFI60414X0091).

### Литература / References

1. O. A. Kaibyshev, F.Z. Utyashev. Superplasticity, grain structure refinement and processing of hard-to-deform alloys. М. Nauka. (2002) 438 p. (in Russian) [О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. Сверхпластичность, измельчение структуры зерен и обработка труднодеформируемых сплавов. М. Наука, (2002) 438 с.]
2. US Patent #35119503, 1967 [Патент США № 35119503, 1967.]
3. F.Z. Utyashev, V.A. Valitov. Technology of light alloys. 2, 63—69 (1982). (in Russian) [Ф.З. Утяшев, В.А. Валитов. Технология легких сплавов. 2, 63—69 (1982).]
4. V.L. Kolmogorov. Mechanic of metal forming. М. Metallurgija. (1986) 688 p. (in Russian) [В.Л. Колмогоров. Механика обработки металлов давлением. М. Металлургия (1986) 688 с.]
5. F.Z. Utyashev, G.I. Raab. Deformation methods for obtaining and processing of ultrafine-grained and nanostructured materials. Ufa. Gilem. (2013) 376 p. (in Russian) [Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб. Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. Уфа. Гилем, НИК Башк. энцикл. (2013) 376 с.]
6. F.Z. Utyashev, R.Yu. Sukhorukov, V.L. Afonin, R.R. Mulyukov, A.A. Nazarov. Problems of mechanical engineering and automation. 1, 109—116 (2012). (in Russian) [Ф.З. Утяшев, Р.Ю. Сухоруков, В.Л. Афонин, Р.Р. Мулюков, А.А. Назаров. Проблемы машиностроения и автоматизации. 1, 109—116 (2012).]
7. O.A. Kaibyshev, F.Z. Utyashev. Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming. ISTC Science and Technology series, V. 3. Virginia USA. Arlington. Futurepast. (2005) 386 p.
8. Sh.Kh. Mukhtarov, M.I. Nagimov, A.G. Ermachenko. Letters on Materials. 2 (4), 257—261 (2012). (in Russian) [Ш.Х. Мухтаров, М.И. Нагимов, А.Г. Ермаченко. Письма о материалах. 2 (4), 257—261 (2012).]