

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА РАСКАТНЫХ КОЛЕЦ

© 2016 г. В.А. Костышев, Я.А. Ерисов

Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ)  
им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

Статья поступила в редакцию 10.06.15 г., доработана 16.09.15 г., подписана в печать 22.09.15 г.

Проведен анализ влияния анизотропии механических свойств титановых сплавов на эксплуатационные характеристики кольцевых деталей газотурбинных двигателей (ГТД) с учетом технологического цикла их изготовления. Приводятся необходимые зависимости для определения показателей поперечной деформации при оценке анизотропии при формоизменении. Установлено, что коэффициенты поперечной деформации и прочность металла в процессе формоизменения (ковки и раскатки) возрастают. При этом процесс раскатки способствует появлению трансверсальной изотропии в материале колец. Для оценки влияния величин коэффициентов поперечной деформации на работоспособность конструкции рассмотрено напряженное состояние в полых однородном цилиндре под действием внутреннего и наружного давлений. Эта схема с достаточной степенью достоверности описывает условия работы проставки дисков компрессора ГТД без учета осевых нагрузок. Анализ показал, что при возрастании коэффициентов поперечной деформации допустимое внутреннее давление, воспринимаемое проставкой, увеличивается.

**Ключевые слова:** раскатка колец, анизотропия механических свойств, материальный тензор, работоспособность, показатели анизотропии.

**Костышев В.А.** — докт. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением СГАУ (443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34). Тел.: (846) 334-09-04. E-mail: kostyshev@ssau.ru.

**Ерисов Я.А.** — канд. техн. наук, вед. инженер НИЛ-37 СГАУ. Тел.: (846) 267-46-89. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru.

**Для цитирования:** Костышев В.А., Ерисов Я.А. Исследование формирования анизотропии механических свойств в процессе производства раскатных колец // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. № 1. С. 32–38.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-32-38.

*Kostyshev V.A., Erisov Ya.A.*

### *Study of mechanical anisotropy formation in rolled ring production*

The effect of titanium alloy mechanical anisotropy on the performance of gas turbine engine (GTE) ring-shaped parts was analyzed with account for their production cycle. Necessary dependencies were provided for transverse strain identification when assessing anisotropy during forming. It was found that both transversal strain coefficients and metal strength increase during the forming process (forging and rolling). In addition, the rolling process facilitates the transversal isotropy occurrence in the ring material. The stress state in a hollow homogenous cylinder under internal and external pressures was examined to evaluate the effect of transverse strain coefficients on the structure functionality. This scheme describes operating conditions of GTE compressor disks spacer with a reasonable degree of certainty while ignoring axial loads. The analysis showed that the allowable internal pressure taken by the spacer increases with the increase of transverse strain coefficients.

**Key words:** ring rolling, mechanical anisotropy, material tensor, availability, anisotropy values.

**Kostyshev V.A.** — Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of metal forming, Samara State Aerospace University (SSAU) (443086, Russia, Samara, Moskovskoe sh., 34). E-mail: kostyshev@ssau.ru.

**Erisov Ya.A.** — Cand. Sci. (Tech.), senior engineer, NIL-37, SSAU. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru.

**Citation:** Kostyshev V.A., Erisov Ya.A. Issledovanie formirovaniya anizotropii mekhanicheskikh svoystv v protsesse proizvodstva raskatnykh kolets. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 1. P. 32–38. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-32-38.

## Введение

Быстрое развитие современной авиации требует дальнейшего совершенствования технологических процессов на основе важнейших достижений науки, в том числе и за счет более полного ис-

пользования свойств обрабатываемого материала. В связи с этим необходимы исследования поведения металла при различных стадиях технологической обработки. При этом следует исходить

из того факта, что деформированные заготовки авиационных деталей — листы, трубы, профили, прутки, кольца и т.п. — обладают определенной анизотропией механических свойств, которая во многом зависит от вида технологического процесса получения полуфабрикатов (волочение, пресование, прокатка, раскатка, ковка и т.п.).

Известно, что в основе процесса получения колец раскаткой лежит прокатка. Поэтому, основываясь на факторах, влияющих на текстуру проката и рассмотренных в работах [1—12]:

— граничные условия (состояние поверхности рабочих валков и слитка, форма калибров, смазка валков, температура проката);

— геометрия очага деформации (отношение ширины и длины очага к его высоте);

— механизмы деформации (кристаллографическая ориентировка исходной заготовки, химический состав металла, чередование направлений преобладающей деформации),

можно утверждать, что текстура, а значит, и анизотропия раскатных колец в основном зависят от схемы напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, т.е. от наличия высокого или низкого очага деформации. Так как исследованиями [13] установлено, что в случае высокого очага деформации не только снижается (на 10—15 %) средний уровень механических свойств полуфабриката, но и не обеспечивается стабильная текстура вследствие резко неоднородного напряженного состояния в очаге деформации при проработке, то можно утверждать о необходимости создания условий низкого очага деформации. Поэтому цель данной работы — изучение поведения материала при раскатке роторных колец при низком очаге деформации.

## Методика исследований

Для исследований изготавливались кольца из горячекатаного прутка сплава ВТ9 диаметром 110 мм. Заготовка из указанного прутка высотой 267 мм ковалась (осадка, прошивка, разгонка по оправке) на кольцевую заготовку с наружным и внутренним диаметрами соответственно 326 мм и 274 мм высотой 85 мм ( $\varnothing 326 \times \varnothing 274 \times 85$  мм). Затем это кольцо раскатывалось на раскатной машине модели РМ1200 до размеров  $\varnothing 719 \times \varnothing 697 \times 85$  мм. Температура начала деформации под ковку выбиралась на 20 °С выше точки полиморфного превращения, а под раскат — на такую же величину ниже этой точки. Температура конца ковки обеспечи-

валась не меньше 850 °С, нижний температурный предел раскатки — 800 °С. При ковке осуществлялись два подогрева до 960 °С с выдержкой 15—20 мин, при раскатке — один подогрев по этому же режиму. Указанные режимы формоизменения типичны для серийной технологии раската, принятой в СНТК им. Н.Д. Кузнецова (г. Самара). Термообработка проводилась по стандартному режиму.

Для исследования анизотропии механических свойств вырезали образцы по стадиям формоизменения заготовки согласно схеме, приведенной на рис. 1. Испытания проводили на 6 образцах каждого направления. Образцы вырезались фрезой с припуском 0,5 мм на сторону, после чего они подвергались чистовой фрезеровке и полировке.

Форма, размеры и разметка образцов соответствовали рис. 2. Измерения образцов осуществлялись в 5 сечениях. Разметка для замеров деформации рабочей части производилась на делительной машине. Длину, ширину и толщину элементов рабочей части образцов замеряли на инструментальном микроскопе с точностью измерения 0,005 мм, с такой же точностью определяли среднюю арифметическую величину измерения. Замеры пара-

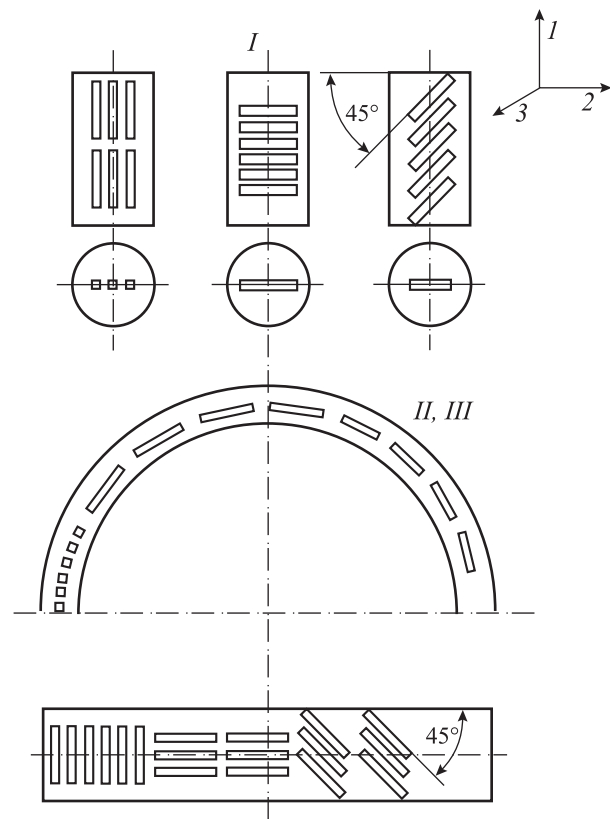


Рис. 1. Схема вырезки образцов из исходного прутка (I) и из кованого (II) и раскатного (III) колец

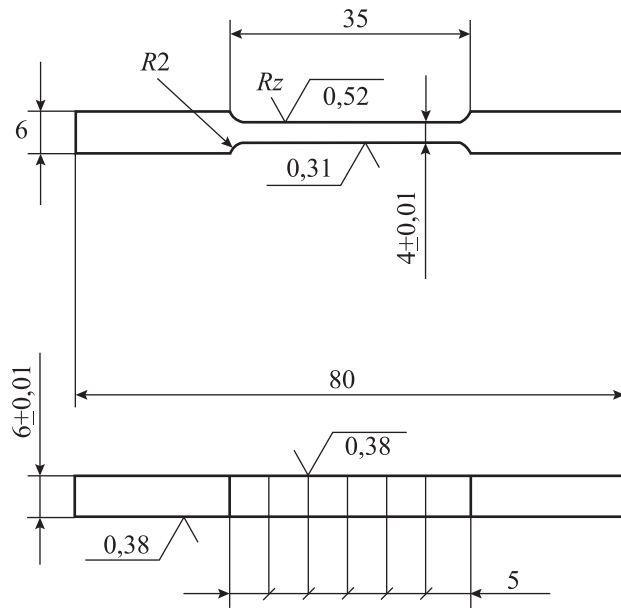


Рис. 2. Образец для исследования анизотропии

метров рабочей части выполняли до и после деформирования образцов. Скорость растяжения образцов соответствовала 10 мм/мин.

Для оценки анизотропии использовались коэффициенты поперечной деформации  $\mu_{ij}$ , представляющие собой отношение логарифмической деформации по ширине образца ( $e_b$ ) к деформации по его длине ( $e_l$ ) [2]:

$$\mu_{ij} = -e_b / e_l, \quad (1)$$

где индекс  $i$  соответствует направлению поперечной деформации при линейном растяжении образца вдоль направления  $j$  (см. рис. 1).

Для оценки точности эксперимента проводился анализ взаимосвязи между погрешностью вычислений коэффициентов анизотропии  $\Delta\mu_{ij}$ , точностью измерительного инструмента ( $\eta$ ), толщиной ( $S$ ) и шириной ( $b$ ) профиля, а также степенью деформации при растяжении ( $e_l$ ) по методике [14]. Считая погрешности измерения начальных и текущих размеров равными, получили расчетную формулу

$$\frac{\Delta\mu_{ij}}{\mu_{ij}} = \frac{\eta\sqrt{2}}{e_l} \sqrt{\left(\frac{1-\mu_{ij}}{b\mu_{ij}}\right)^2 + \frac{1}{S^2}}. \quad (2)$$

По формуле (2) можно определить величину наименьшей деформации и размеры поперечного сечения, обеспечивающие относительную погрешность при нахождении  $\mu_{ij}$  в пределах заданной точности, например 5 %. Так, если считать, что  $\mu_{ij}$  для титановых сплавов соответствует пределам

0,5–0,7 и испытывались образцы шириной  $b = 6$  мм, то необходимая точность будет обеспечена при измерении инструментальным микроскопом ( $\eta = 0,005$ ), если толщина материала  $S_0 = 4$  мм, а деформация  $e_l \geq 4$  %. В этом случае можно применить метод непосредственного замера поперечных сечений образца.

Дальнейшая обработка результатов эксперимента велась методами математической статистики по рекомендациям, изложенным в работе [15]. Сначала вычислялось среднее значение величины (математическое ожидание):

$$\bar{\mu}_{ij} = n^{-1} \sum_{m=1}^n \mu_{ij(m)}, \quad (3)$$

где  $n$  — количество вычислительных показателей  $\mu_{ij}$  по 6 образцам.

Затем определялась среднеквадратическая ошибка единичного результата для  $n$  чисел:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (\bar{\mu}_{ij} - \mu_{ij(m)})^2}{n-1}}. \quad (4)$$

Промахи в экспериментах обрабатывались на основании правила Райта:

$$\mu_{ij(m)} - \bar{\mu}_{ij} > 3S_n. \quad (5)$$

Для определения границ доверительного интервала (при том или ином коэффициенте надежности  $\alpha$ ) использовалась таблица распределения Стьюдента. Необходимые значения коэффициента Стьюдента вычислялись из соотношения

$$t_{\alpha n} = \Delta\mu_{ij} \sqrt{n} / S_n. \quad (6)$$

Величина доверительного интервала выбиралась таким образом, чтобы  $\alpha \geq 0,95$ . На основании изложенной методики была составлена программа расчета коэффициентов поперечной деформации на ЭВМ.

Характеристики механических свойств (временное сопротивление  $\sigma_B$ , относительное удлинение  $\delta$ , относительное сужение  $\psi$ ) определялись в соответствии с ГОСТ 1497 и рассчитывались как среднее арифметическое результатов, полученных при испытании 6 образцов.

## Результаты и их обсуждение

Полученные после расчета показатели анизотропии представлены в табл. 1, а характеристики механических свойств — в табл. 2.

Таблица 1  
Значения показателей анизотропии  
по стадиям обработки колец из сплава ВТ9

Стадии обработки	$\mu_{21}$	$\mu_{12}$	$\mu_1$
Исходный пруток (I)	0,528	0,524	0,526
Кованая заготовка (II)	0,549	0,552	0,551
Раскатное кольцо (III)	0,570	0,556	0,564

Таблица 2  
Изменение прочности и пластичности колец  
из сплава ВТ9 по стадиям обработки

Стадии обработки	Направление	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Исходный пруток (I)	1	1015	14,8	27,5
	2	1007	13,6	28,3
Кованая заготовка (II)	1	1065	17,9	40,8
	2	1066	18,0	41,2
Раскатное кольцо (III)	1	1100	12,0	29,6
	2	1080	10,8	27,3
Нормы технических условий		$\geq 1050$	$\geq 8,0$	$\geq 20,0$

Из табл. 1, 2 видно, что коэффициенты поперечной деформации и прочность металла в процессе формоизменения возрастают. Некоторое снижение пластичности раскатных колец объясняется значительной величиной остаточных напряжений, наводимых в процессе раскатки за счет обеспечения температурных условий теплой раскатки.

Незначительное отличие величин коэффициентов поперечной деформации  $\mu_{21}$ ,  $\mu_{12}$  и  $\mu_1$  раскатных колец позволяет утверждать о достаточной однородности материала колец как в тангенциальном, так и в осевом направлениях, т.е., другими словами, процесс раскатки способствует появлению трансверсальной изотропии в материале колец.

Исследованиями установлено [16, 17], что с увеличением деформации до 60—70 %, как правило, у целого ряда сплавов наблюдается стабилизация или стремление к стабилизации показателей анизотропии. В данном случае на раскатных кольцах также имеет место стремление к стабилизации показателей анизотропии (см. табл. 1). Это явление хорошо описано авторами работы [18], которые достаточно полно рассмотрели структуру компонент материального тензора. Ими были даны методы

расчета, которые были использованы в настоящей работе.

Рассмотрим компоненты материального тензора  $K$  [18]:

$$\begin{aligned} K_{iii} &= t_0 \left( \frac{2}{3} + k\lambda_i^2 \right), \\ K_{ijj} &= t_0 \left( -\frac{1}{3} + k\lambda_i\lambda_j \right), \\ K_{jjj} &= t_0 / 2, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $t_0$  — произвольный множитель;  $k$  — скаляр, отражающий природу материала;  $\lambda_i$  — компоненты направляющего тензора, которые лежат в основе показателей анизотропии:

$$\mu_{ij} = -\frac{K_{ijj}}{K_{jjj}} = \frac{1 - 3k\lambda_i\lambda_j}{2 + 3k\lambda_i^2}. \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) следует, что необходимый вид анизотропии можно получить за счет изменения  $k$  и  $\lambda_i$ , значения которых можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} k &= \frac{4 \left( \frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 1 \right) (1 - \mu_1)}{\left( \frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 2 \right) (1 + \mu_1)} - 2, \\ \lambda_1^2 &= \frac{2}{k} \left[ \frac{\frac{1}{\mu_{21}} (1 - \mu_1)}{\left( \frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 2 \right) (1 + \mu_1)} - \frac{1}{3} \right], \\ \lambda_2^2 &= \frac{2}{k} \left[ \frac{\frac{1}{\mu_{12}} (1 - \mu_1)}{\left( \frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 2 \right) (1 + \mu_1)} - \frac{1}{3} \right], \\ \lambda_3^2 &= \frac{2}{k} \left[ \frac{1 - \mu_1}{1 + \mu_2} - \frac{1}{3} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Как показано в работе [18], изменение анизотропии происходит, когда скаляр  $k$  меняет свой знак. Из выражений (9) видно, что  $k \geq 0$  при  $\mu_{ij} \leq 0,5$  и  $k \leq 0$  при  $\mu_{ij} \geq 0,5$ . Таким образом, знак скаляра  $k$  будет меняться при переходе  $\mu_{ij}$  через значение 0,5. Для данного случая скаляр  $k$  имеет, соответственно стадиям обработки, следующие значения:  $k_I = -0,070$ ;  $k_{II} = -0,133$ ;  $k_{III} = -0,167$ , т.е. его знак остается без изменения, а следовательно,

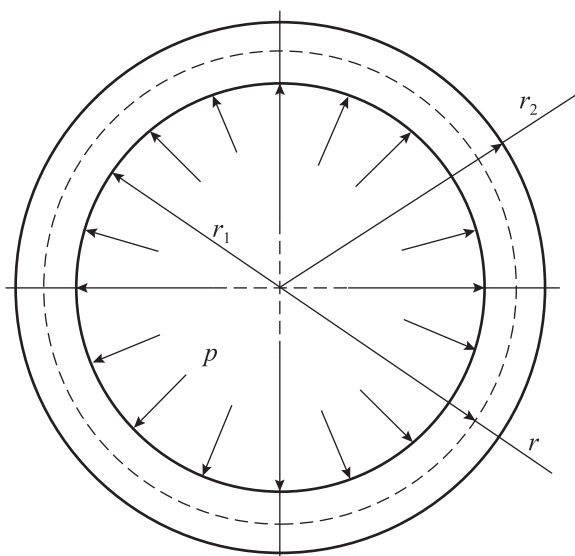


Рис. 3. Схема нагружения роторного промежуточного кольца при эксплуатации на двигателе

анизотропия не претерпевает принципиальных изменений.

Для оценки влияния величин коэффициентов поперечной деформации на работоспособность конструкции рассмотрим напряженное состояние в полем однородном цилиндре под действием внутреннего и наружного давлений. Данная схема с достаточной степенью достоверности описывает условия работы проставки дисков компрессора газотурбинных двигателей без учета осевых нагрузок. Проставка, при условии жесткой заделки, подвержена воздействию внутреннего и наружного давлений (причем внутреннее превышает наружное), а также воздействию центробежных сил и радиальных сил от термического расширения дисков. Результирующие этих сил будут располагаться по схеме, аналогичной распределению напряжений в цилиндре, нагруженном внутренним давлением (рис. 3).

Рабочие напряжения в кольце с учетом анизотропии упругих свойств можно рассчитать по формулам [19]:

$$\sigma_r = \frac{pc^{v+1}}{1-c^{2v}} \left[ \left( \frac{r}{r_2} \right)^{v-1} - \left( \frac{r_2}{r} \right)^{v+1} \right],$$

$$\sigma_\theta = \frac{pvc^{v+1}}{1-c^{2v}} \left[ \left( \frac{r}{r_2} \right)^{v-1} - \left( \frac{r_2}{r} \right)^{v+1} \right],$$
(10)

где  $p$  — внутреннее давление;  $c = r_1/r_2$  — отношение внутреннего ( $r_1$ ) и внешнего ( $r_2$ ) радиусов сечения;  $v = \sqrt{E_\theta/E_r}$  — отношение модулей Юнга в танген-

циальном ( $E_\theta$ ) и радиальном ( $E_r$ ) направлениях;  $r$  — переменный радиус.

Используя уравнения (10) и условие пластичности в виде [20]:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \frac{\sigma_s}{\sqrt{1-\mu_{21}\mu_{12}}},$$
(11)

где  $\sigma_s$  — предел текучести материала, получим формулу для определения давления  $p$  на внутренней поверхности кольца:

$$p = \frac{\sigma_s}{\sqrt{1-\mu_{21}\mu_{12}} \left( 1 + v \frac{c^{2v} + 1}{c^{2v} - 1} \right)}.$$
(12)

Из анализа формулы (12) очевидно, что при возрастании коэффициентов поперечной деформации  $\mu_{12}$  и  $\mu_{21}$  допустимое давление  $p$  будет увеличиваться.

## Заключение

На основании вышеизложенных результатов исследований можно заключить, что при формирующей обработке кольца, обеспечивающей однородную оптимальную структуру и свойства, эксплуатационная надежность детали возрастает не только за счет повышения прочности металла, но и вследствие более четкого проявления анизотропии свойств при деформации.

## Литература

1. Смирнов В.С., Дурнев В.Д. Текстурирование металлов при прокатке. М.: Металлургия, 1971.
2. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов: Резервы интенсификации. М.: Машиностроение, 1998.
3. Гречников Ф.В., Уваров В.В. Энергетическое условие пластичности при разных по величине пределах текучести на сжатие и растяжение // Изв. СЦ РАН. 2008. No. 3. С. 881—883.
4. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А. Разработка критерия пластичности для расчетов формоизменения высокотекстурированных анизотропных заготовок // Вестн. СГАУ. 2012. No. 1. С. 94—99.
5. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение микроструктуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М.: Наука, 2002.
6. Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z. Superplasticity: microstructural refinement and superplastic roll forming // Future-

past: Inc. USA, ISTC Science & Technology Series. 2005. Vol. 3. P. 386.

7. Утяшев Ф.З., Булаков И.А., Гейкин В.А., Морозов В.В., Мулюков Р.Р., Назаров А.А., Сухоруков Р.Ю. Научные основы высокоэффективной технологии раскатки осесимметричных деталей ротора газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов // Пробл. машиностроения и надежности машин. 2013. No. 5. С. 96—105.
  8. Bewlay B.P., Gigliotti M.F.X., Utyashev F.Z., Kaibyshev O.A. Superplastic roll forming of Ti alloys // *Materials & Design*. 2000. Vol. 21. No. 4. P. 287—295.
  9. Bewlay B.P., Gigliotti M.F.X., Hardwicke C.U., Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z., Salischev G.A. Net-shape manufacturing of aircraft engine disks by roll forming and hot die forging // *J. Mater. Process. Technol.* 2003. Vol. 135. No. 2—3. P. 324—329.
  10. Ryoo J.S., Yang D.Y., Johnson W. The influence of process parameters on torque and load in ring rolling // *J. Mech. Work. Technol.* 1986. Vol. 12. No. 3. P. 307—321.
  11. Allwood J.M., Tekkaya A.E., Stanistreet T.F. The development of ring rolling technology // *Steel Res. Int.* 2005. Vol. 76. No. 2—3. P. 111—120.
  12. Johnson W., MacLeod I., Needham G. An experimental investigation into the process of ring or metal tyre rolling // *Int. J. Mech. Sci.* 1968. Vol. 10. No. 6. P. 455—468.
  13. Мурзов А.И. К вопросу о проблеме деформации металла, находящегося в зоне валков // *Алюм. сплавы и спец. материалы*. 1977. No. 10. С. 134—143.
  14. Кассандрова С.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдения. М.: Наука, 1970.
  15. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974.
  16. Engler O., Hirsch J. Control of recrystallisation texture and texture-related properties in industrial production of aluminium sheet // *Int. J. Mater. Res.* 2009. Vol. 100. No. 4. P. 564—575.
  17. Уваров В.В., Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. О возможностях регулирования анизотропии листовых материалов // *Теория и технология обработки металлов давлением: Тр. КуАИ. Куйбышев: КуАИ*, 1977. С. 17—21.
  18. Арышенский Ю.М., Калужский И.И., Уваров В.В. Некоторые вопросы теории пластичности ортотропных сред // *Изв. вузов. Авиац. техника*. 1969. No. 2. С. 15—18.
  19. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977.
  20. Арышенский Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1973.
- ## References
1. Smirnov V.S., Durnev V.D. *Teksturoobrazovanie metallov pri prokatke* [Formation of texture in metals by rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1971.
  2. Grechnikov F.V. *Deformirovanie anizotropnykh materialov: Rezervy intensivifikatsii* [Deformation of anisotropic materials: Intensification reserves]. Moscow: Mashinostroenie, 1998.
  3. Grechnikov F.V., Uvarov V.V. Energeticheskoe uslovie plastichnosti pri raznykh po velichine predelakh tekuchesti na szhatie i rastyazhenie [Energy yield criteria at different tensile and compression yield stresses]. *Izv. Samarskogo Nauchnogo Tsentra Ross. Akademii Nauk*. 2008. No. 3. P. 881—883.
  4. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. Razrabotka kriteriya plastichnosti dlya raschetov formoizmeneniya vysokoteksturoirovannykh anizotropnykh zagotovok [Development of yield criteria for calculation of forming of highly textured anisotropic blanks]. *Vestnik Samarskogo Gos. Aerokosm. Univ.* 2012. No. 1. P. 94—99.
  5. Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z. *Sverkhplastichnost', izmelchenie struktury i obrabotka trudnodeformiruemyykh splavov* [Super plasticity, structure refinement and treatment of difficult-to-form alloys]. Moscow: Nauka, 2002.
  6. Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z. Superplasticity: microstructural refinement and superplastic roll forming. *Future-past: Inc. USA, ISTC Science & Technology Series*. 2005. Vol. 3. P. 386.
  7. Utyashev F.Z., Burlakov I.A., Geikin V.A., Morozov V.V., Mulyukov R.R., Nazarov A.A., Cukhorukov R.Yu. Nauchnye osnovy visokoeffektivnoi tekhnologii raskatki osesimmetrichnykh detalei rotora gazoturbinnnykh dvigatelei iz zharoprochnykh splavov [Scientific base of highly effective technology of ring rolling of axisymmetric parts of rotor of gas-turbine engine from super alloys]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2013. No. 5. P. 96—105.
  8. Bewlay B.P., Gigliotti M.F.X., Utyashev F.Z., Kaibyshev O.A. Superplastic roll forming of Ti alloys. *Materials & Design*. 2000. Vol. 21. No. 4. P. 287—295.
  9. Bewlay B.P., Gigliotti M.F.X., Hardwicke C.U., Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z., Salischev G.A. Net-shape manufacturing of aircraft engine disks by roll forming and hot die forging. *J. Mater. Process. Technol.* 2003. Vol. 135. No. 2—3. P. 324—329.
  10. Ryoo J.S., Yang D.Y., Johnson W. The influence of process parameters on torque and load in ring rolling. *J. Mech. Work. Technol.* 1986. Vol. 12. No. 3. P. 307—321.
  11. Allwood J.M., Tekkaya A.E., Stanistreet T.F. The deve-

- lopment of ring rolling technology. *Steel Res. Int.* 2005. Vol. 76. No. 2–3. P. 111–120.
12. *Johnson W., MacLeod I., Needham G.* An experimental investigation into the process of ring or metal tyre rolling. *Int. J. Mech. Sci.* 1968. Vol. 10. No. 6. P. 455–468.
  13. *Murzov A.I.* K voprosu o probleme deformatsii metalla, nakhodyashchegosya v zone valkov [Revisiting the problem of metal deformation in the rolls zone]. *Aluminievie splavi i spetsial'nie materialy.* 1977. No. 10. P. 134–143.
  14. *Kassandrova O.N., Lebedev V.V.* Obrabotka rezul'tatov nablyudenii [Processing of results of observations]. Moscow: Nauka, 1970.
  15. *Zaidel A.N.* Oshibki izmerenii fizicheskikh velichin [Errors of measuring quantities]. Leningrad: Nauka, 1974.
  16. *Engler O., Hirsch J.* Control of recrystallisation texture and texture-related properties in industrial production of aluminium sheet. *Int. J. Mater. Res.* 2009. Vol. 100. No. 4. P. 564–575.
  17. *Uvarov V.V., Arishenskii Yu.M., Grechnikov F.V.* O vozmozhnostyakh regulirovaniya anizotropii listovikh materialov [About the possibilities of controlling anisotropy of sheet materials]. *Teoriya i tekhnologiya obrabotki metallov davleniem: Proceedings of KuAI.* Kuibishev: KuAI, 1977. P. 17–21.
  18. *Arishenskii Yu.M., Kaluzhskii I.I., Uvarov V.V.* Nekotore voprosi teorii plastichnosti ortotropnikh sred [Some problems of plasticity theory of orthotropic medium]. *Izv. vuzov. Aviatcionnaya tekhnika.* 1969. No. 2. P. 15–18.
  19. *Lekhnitskii S.G.* Teoriya uprugosti anizotropnogo tela [Elasticity theory of anisotropic body]. Moscow: Nauka, 1977.
  20. *Arishenskii Yu.M.* Teoriya listovoi shtampovki anizotropnikh materialov [Theory of sheet forming of anisotropic materials]. Saratov: Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, 1973.