

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА. РАСКАТНЫХ КОЛЕЦ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Костышев В.А.

Быстрое развитие современной авиации требует дальнейшего совершенствования технологических процессов на основе важнейших достижений науки, в том числе и за счет более полного использования 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. Анизотропия свойств металла во многом зависит от вида технологического процесса получения полуфабрикатов - волочение, прессование, 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 работе [1]:

- 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);
- механизм деформации (кристаллографическая ориентировка исходной заготовки, химический состав металла, чередование направлений преобладающей деформации),

можно утверждать, что текстура, а значит и анизотропия раскатных колец, в основном, зависит от схемы напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, т.е. от наличия высокого или низкого очага деформации. Так как исследованиями [2] установлено, что наличие низкого очага деформации не только снижает средний уровень механических свойств полуфаб-

риката на 10...15%, но и не обеспечивает стабильной текстуры, вследствие резко неоднородного напряженного состояния в очаге деформации при проработке, можно утверждать необходимость обеспечения условий низкого очага деформации. Основываясь на этом принципе, в данной статье рассматривается поведение материала применительно к раскатке роторных колец при низком очаге деформации.

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 наружным диаметром 326 мм, внутренним диаметром 274 мм, высотой кольца 85 мм ( $\varnothing 326 \times \varnothing 274 \times 85$ ). Затем это кольцо раскатывалось на раскатной машине модели РМ1200 до размеров  $\varnothing 719 \times \varnothing 697 \times 85$ . Температура начала деформации под ковку выбиралась на 20°C выше точки полиморфного превращения, а под раскат - ниже точки полиморфного превращения на такую же величину. Температура конца ковки обеспечивалась не ниже 850°C, нижний температурный предел раскатки - 800°C. При ковке производилось два подогрева до 960°C с выдержкой 15...20 мин., при раскатке один подогрев по этому же режиму. Указанные режимы формоизменения типичны для серийной технологии раската, принятого на СНТК им. Н.Д.Кузнецова. Термообработка производилась по стандартному режиму.

Образцы вырезались по стадиям формоизменения заготовки, согласно схеме, приведенной на рис. 1. Образцы вырезались фрезой с припуском 0,5 мм на сторону, после чего они подвергались чистовой фрезеровке и полировке. Форма и размеры образцов соответствовали рис. 2. Разметка для замеров деформации рабочей части производилась на делительной машине. Длина, ширина и толщина элементов рабочей части образцов замерялась на инструментальном микроскопе модели БМИ-1 с точностью измерения 0,005 мм, с такой же точностью определялась средняя арифметическая величина измерения. Замеры параметров рабочей части выполнялись до и после де-

формирования образцов. Скорость растяжения образцов соответствовала 10 мм/мин. Для оценки точности эксперимента производился анализ взаимосвязи между погрешностью вычисления коэффициентов анизотропии  $\Delta\mu_{ij}$ , точностью измерительного инструмента  $\delta$ , толщиной профиля  $S$  и степенью деформации при растяжении  $e_1$ , по методике, изложенной в работе [3]. Считая погрешности измерения начальных и текущих размеров равными, получим расчетную формулу

$$\frac{\Delta\mu_{ij}}{\mu_{ij}} = \frac{\delta\sqrt{2}}{e_1} \sqrt{\left(\frac{1-\mu_{ij}}{b\mu_{ij}}\right)^2 + \frac{1}{S^2}} \quad (1)$$

По ней можно определить величину наименьшей деформации и размеров поперечного сечения, обеспечивающих относительную погрешность при нахождении  $\mu_{ij}$  в пределах заданной точности, например, 5%.

Если считать, что  $\mu_{ij}$  для титановых сплавов лежит в пределах 0,5...0,7 и образцы испытывались шириной  $b=6$  мм, то необходимая точность будет обеспечена при измерении инструментальным микроскопом ( $\delta = 0,005$ ), если толщина материала  $S_0=4$  мм, а деформация  $e_1 \geq 4\%$ . В этом случае можно применить метод непосредственного замера поперечных сечений образца.

Испытания проводились на шести образцах каждого направления с измерением в пяти сечениях. Дальнейшая обработка результатов эксперимента велась методами математической статистики по рекомендациям, изложенным в работе [4].

В начале вычислялось среднее значение величины (математическое ожидание)

$$\bar{\mu}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{ij}(k)}{n}$$

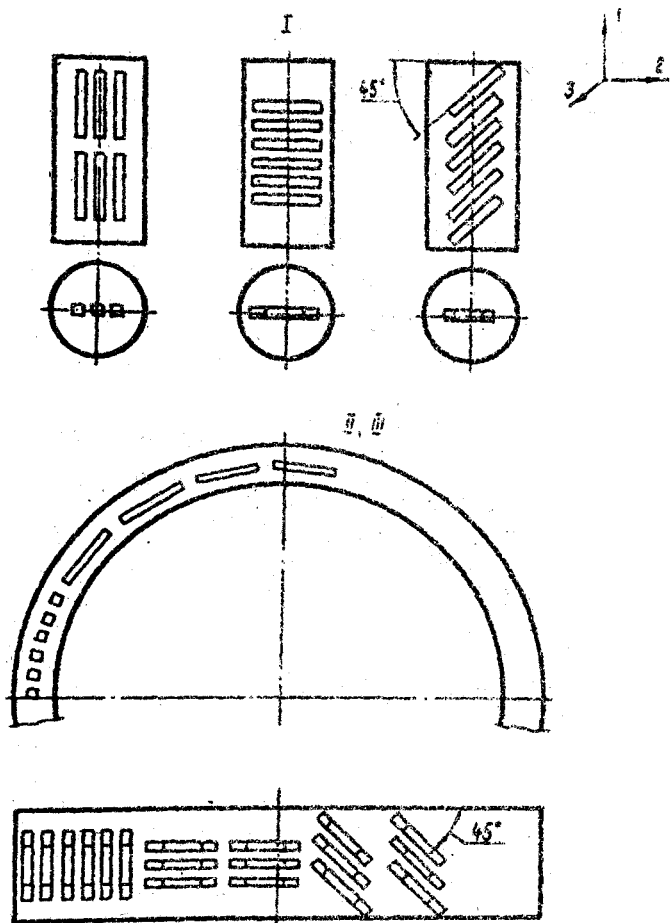


Рис. 1. Схема вырезки образцов из исходного прутка (1) и из ковкого и раскатного кольца (2,3)

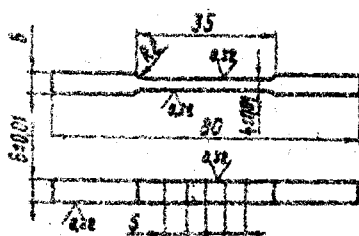


Рис. 2. Образец для исследования анизотропии

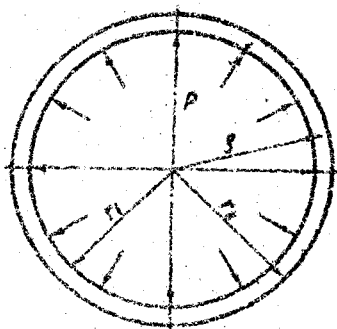


Рис. 3. Схема нагружения роторного промежуточного кольца при эксплуатации на двигателе

где  $n$  - количество вычисленных показателей  $\mu_{ij}$  по шести образцам.

Затем определялась среднеквадратическая ошибка единичного результата для  $n$  чисел

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

Промахи в экспериментах обрабатывались на основании правила Райта

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

Для определения границ доверительного интервала (при том или ином коэффициенте надежности  $\alpha$ ) использовались таблицы распределения Стьюдента. Необходимые значения коэффициентов Стьюдента определялись из соотношения

$$t_{\alpha n} = \frac{\Delta \mu_{ij} \sqrt{n}}{S_n}.$$

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

Полученные после расчета результаты представлены в табл. 1, а характеристики механических свойств  $\sigma_s, \delta, \psi$  определялись в соответствии с ГОСТ 1497 и подсчитывались как среднее арифметическое результатов, полученных при испытании шести образцов (табл. 2).

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 тепловой раскатки.

Незначительное отличие величин коэффициентов поперечной деформации раскатных колец  $\mu_{21}$ ,  $\mu_{12}$ ,  $\mu_1$  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 [5, 6, 7] установлено, 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 [7], которые достаточно полно рассмотрели структуру компонент материального тензора. Им были даны методы расчета, которые были использованы в данной работе.

Рассматривая компонент материального тензора [7]:

$$\begin{aligned} K_{\alpha\alpha} &= t_0 \left( \frac{2}{3} + k \lambda_1^2 \right); \\ K_{\beta\beta} &= t_0 \left( -\frac{1}{3} + k \lambda_1 \lambda_2 \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $t_0$  - произвольный множитель;

$\lambda_1, \lambda_2$  - компоненты направляющего тензора, которые лежат в основе показателей анизотропии

$$\mu_{ij} = -\frac{K_{\beta\beta}}{K_{\alpha\alpha}} = \frac{1 - 3k \lambda_1 \lambda_2}{2 + 3k \lambda_1^2}, \quad (3)$$

где  $k$  - скаляр, отражающий природу материала, из выражений (2) и (3) следует, что необходимый вид анизотропии можно получить за счет изменения  $k$  и  $\lambda_{ij}$ .

Как показано в работе [7], изменение анизотропии происходит, когда скаляр  $k$  меняет свой знак.

Таблица 1

Изменение показателей анизотропии по стадиям обработки колец из сплава ВТ9

Стадия обработки	Показатели анизотропии		
	$\mu_{21}$	$\mu_{12}$	$\mu_1$
Исходный пруток	0,528	0,524	0,526
Кованая заготовка	0,549	0,552	0,551
Раскатное кольцо	0,570	0,556	0,564

Таблица 2

Изменение прочности и пластичности колец из сплава ВТ9 по стадиям обработки

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



Значение  $k$  и  $\lambda_{ij}$  можно подсчитать по следующим формулам:

$$k = \frac{4 \left( \frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 1 \right) (1 - \mu_1)}{\left( \frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 2 \right) (1 + \mu_1)} - 2;$$

$$\lambda_1^2 = \frac{2}{k} \left[ \frac{\frac{1}{\mu_{21}} (1 - \mu_1)}{\left( \frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 2 \right) (1 + \mu_1)} - \frac{1}{3} \right]; \quad (4)$$

$$\lambda_2^2 = \frac{2}{k} \left[ \frac{\frac{1}{\mu_{21}} (1 - \mu_1)}{\left( \frac{1}{\mu_{21}} + \frac{1}{\mu_{12}} - 2 \right) (1 + \mu_1)} - \frac{1}{3} \right];$$

$$\lambda_3^2 = \frac{2}{k} \left[ \frac{1 - \mu_1}{1 + \mu_1} - \frac{1}{3} \right].$$

Из этих выражений видно, что при  $k \geq 0, \mu \leq 0,5$ , а при  $k \leq 0, \mu \geq 0,5$ . Таким образом, знак скаляра  $k$  будет меняться при переходе  $\mu$  через значение 0,5. Для данного случая скаляр  $k$  соответственно сталиям обработки имеет следующие значения:  $k_1 = -0,070$ ;  $k_2 = -0,133$ ;  $k_3 = -0,167$ , т. е. знак скаляра остается без изменений, а, следовательно, анизотропия не претерпевает принципиальных изменений.

Для оценки влияния величин коэффициентов поперечной деформации на работоспособность конструкции рассмотрим напряженное состояние в полом однородном цилиндре под действием внутреннего и наружного давлений (рис. 3). Данная схема с достаточной степенью достоверности описы-

вает условия работы проставки дисков компрессора, без учета осевых нагрузок. Проставка, при условии жесткой заделки, подвержена воздействию внутреннего и наружного давлений, причем внутреннее давление 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.

Тогда рабочие напряжения в кольце с учетом анизотропии, рассчитываются по формулам [8]:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta} &= \frac{\rho c^{n+1}}{1-c^{2n}} n \left(\frac{\rho}{r_2}\right)^{n-1} + \frac{p}{1-c^{2n}} n c^{n+1} \left(\frac{r_2}{\rho}\right)^{n-1}; \\ \sigma_r &= \frac{\rho c^{n+1}}{1-c^{2n}} \left(\frac{\rho}{r_2}\right)^{n-1} - \frac{p}{1-c^{2n}} c^{n+1} \left(\frac{r_2}{\rho}\right)^{n-1}\end{aligned}\quad (5)$$

где  $p$  - внутренне давление;

$c$  - отношение внутреннего и внешнего радиусов сечения,

$$c = \frac{r_1}{r_2};$$

$n$  - коэффициент,  $n = \sqrt{\frac{E_{\theta}}{E_r}}$ ;

$\rho$  - переменный радиус.

Используя уравнения (5) и условие пластичности в виде [9]

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

получим формулу для определения давления  $p$  на внутренней поверхности цилиндра

$$p = \frac{\sigma_s (1 - c^{2n})}{\sqrt{1 - \mu_{12}\mu_{21}} [c^{2n} (n - 1) + n + 1]}\quad (6)$$

Из анализа формулы (6) очевидно, что при возрастании коэффициентов поперечной деформации  $\mu_1$  и  $\mu_2$  допустимое давление  $p$  будет увеличиваться.

Таким образом, при формоизменяющей обработке кольца, обеспечивающей однородную оптимальную структуру и свойства, эксплуатационная надежность деталей возрастает не только за счет повышения прочности металла, но и за счет более четкого проявления анизотропии свойств при деформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов В.С., Дурнев В.Д. Текстуροобразование металлов при прокатке. М.: Металлургия, 1971. 254 с.
2. Мурзов А.И. К вопросу о проблеме деформации металла, находящегося в зоне валков. В сб.: Алюминиевые сплавы и специальные материалы. 1977, №10, с. 134-143.
3. Косандрова С.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдения. М.: Наука, 1976. 104 с.
4. Зайцев А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. 107 с.
5. Шевелев В.В., Яковлев С.П. Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку. М.: Машиностроение, 1972. 134 с.
6. Brammer J.S., Thomson T.R., Hobbs R.M., Sheet Steels for forming applications. I. Austral Inst. Metals, 1972, 17, №3, pp. 147-157.
7. О возможностях регулирования анизотропии листовых материалов/В.В.Уваров, Ю.М.Арьшениский. В сб.: Теория и технология обработки металлов давлением. Куйбышев, 1977, с. 17-21.
8. Арьшениский Ю.М., Уваров В.В. Элементы теории упругости и пластичности в анизотропии. Куйбышев, 1978. 36 с.
9. Арьшениский Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов. Саратов.: Изд-во Саратовского университета, 1973. 112 с.