

Кондратюк Э.В.¹, Филимоныхин Г.Б.², Титов В.А.³

¹ ГП ЗМБП «Прогресс» им. А.Г. Ивченко. Украина, г. Запорожье.

² Кировоградский национальный технический университет. Украина, г. Кировоград.

³ Национальный технический университет Украины «КПИ». Украина, г. Киев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАР, ОБРАЗУЕМЫХ СТЫКОВКОЙ ЗВЕНЬЕВ РОТОРА КВД

Анотація

Для ротора КВД авіаційного ГТД Д-18Т експериментально перевіряється припущення, що при стиковці двох його ланок утворюється кінематична пара п'ятого класу типу циліндровий шарнір, якщо умовно розглядати кут повороту однієї ланки щодо іншого як ступінь свободи. Перевіряється придатність для визначення положень ланок в роторному пакеті паспортних і технологічних контрольних поверхонь.

Abstract

For the rotor of the aviation gas turbine engine D-18T, they experimentally check supposition that at joining of its two sections there is formed the kinematic pair of the fifth class of the cylindrical joint type, if we conditionally consider the rotation angle of one section with regard to another as a degree of freedom. They check the convenience for definition of links positions in the rotor pack of passport and technological test surfaces.

Введение.

В основе процесса сборки роторов барабанно-дисковой конструкции лежит предположение, что при стыковке двух его звеньев образуется кинематическая пара пятого класса типа цилиндрический шарнир, если условно рассматривать угол поворота одного звена относительно другого как степень свободы. Оптимизация при сборке таких роторов заключается в том, чтобы по характеристикам пар определить такие углы поворота звеньев в роторном пакете, при которых неточности изготовления звеньев будут максимально компенсировать друг друга [1,2]. Традиционно, характеристики пар определяются замером биений стыковочных поверхностей отдельных деталей с последующими расчетами [3]. Этот процесс значительно затрудняют такие факторы, как: неплоскостность торцевых и нецилиндричность боковых стыковочных поверхностей; стыковка звеньев по двум и более поверхностям; износ стыковочных поверхностей от неоднократных сборок и разборок ротора и т.п. В работе [4] было теоретически доказано, что указанные негативные факторы не влияют на тип объекта, образуемого стыковкой двух звеньев. Поэтому в работе [5] был разработан новый метод сборки ротора барабанно-дисковой конструкции, основанный на его двух пробных сборках. В отличие от традиционного метода, в нем характеристики пар определяются

экспериментально – по замерам биений контрольных поверхностей дважды полностью собранного ротора. В работах [6,7] разработанный метод был применен для сборки ротора компрессора высокого давления (КВД) авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) Д-18Т. При этом для определения оптимальных углов поворотов звеньев в работе [6] применялся метод последовательной оптимизации, основанный на последовательной установке звеньев в роторный пакет с наименьшим эксцентриситетом [1,2], а в работе [7] – полной оптимизации, основанный на виртуальном (численном) переборе всех возможных вариантов сборки ротора и на выборе среди этих вариантов оптимального [3].

В настоящей работе, с использованием ротора КВД авиационного ГТД Д-18Т, экспериментально проверяется предположение об образовании кинематических пар пятого класса при стыковке двух звеньев ротора. Также оценивается пригодность контрольных поверхностей ротора для определения положений звеньев в роторном пакете.

1. Общие сведения о собираемом роторном пакете КВД ГТД Д-18Т. Подробные сведения о роторе КВД, его элементах, звеньях, парах, о последовательности сборки, расположении контрольных поверхностей, допустимых биениях приведены в работе [6]. Ниже приводятся только самые общие сведения, необходимые для понимания экспериментов. На рис. 1 показана схема собираемого роторного пакета, состоящего из первых трех звеньев ротора КВД.

Собираемый роторный пакет состоит из элементов (рис. 1): 1 – вал передний; 2 – лабиринт; 3 – колесо 5 ступени; 4 – проставка 6 ступени; 5 – секция 1...4 ступеней.

Первые три звена ротора образуют элементы (рис. 1):

- 1) вал передний (1) и лабиринт (2);
- 2) колесо 5 ступени (3) и проставка 6 ступени (4);
- 3) секция 1...4 ступеней (5).

Три звена образуют две пары, в которых:

- 1) звено 2 условно поворачивается относительно звена 1 на угол φ , с шагом 10° ;
- 2) звено 3 условно поворачивается относительно звена 2 на угол φ , с шагом 10° .

В любой сборке элементы, образующие звено, стыкуются между собой в одном и том же положении. Разворачиваются только звенья.

2. Определение положений звеньев в роторном пакете. На рис. 1 показано расположение паспортных $\Gamma_1 - \Gamma_5$ и технологических $T_1 - T_5$ контрольных поверхностей.

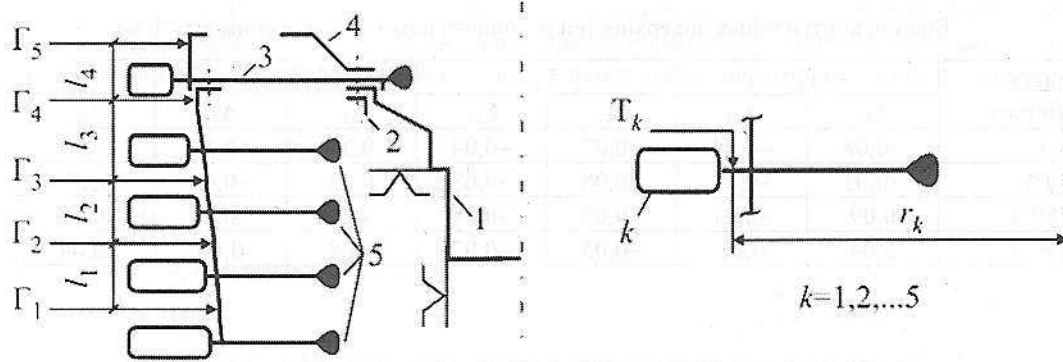


Рис. 1. Роторный пакет из первых трех звеньев ротора КВД ГТД Д-18Т

Паспортные контрольные поверхности предусмотрены конструкцией ротора и выполнены за один проход с центрирующими и стыковочными поверхностями деталей (дисков, валов). В отличие от них технологические контрольные поверхности ротора не обрабатывались указанным образом. Они достаточно гладкие, но не привязаны к стыковочным и центрирующим поверхностям деталей, а значит и их главным центральным осям инерции. Поэтому даже при идеальной установке звена в роторный пакет эти поверхности будут давать некоторые (эталонные) биения.

Положения звеньев в роторном пакете определяются последующим контрольным поверхностям:

1) звено 1 считается идеально установленным на сборочный штатгаль благодаря специальному центрирующему приспособлению;

2) положение звена 2 определяется радиальными биениями поверхности Γ_5 и торцевыми биениями поверхности Γ_5 ;

3) положение звена 3 определяется радиальными биениями поверхности Γ_1 и торцевыми биениями поверхности Γ_4 .

Эксцентриситет контрольной поверхности измеряется по п. 2. раздела 1 ОСТ 1.41672-77 – по четырем контрольным точкам на поверхности [8]. Аналогичным образом измеряется перекося контрольной поверхности. Для этого на каждое звено наносятся 4 метки с шагом в 90° : 1 (0°); 2 (90°); 3 (180°); 4 (270°). Углы откладываются против хода стрелки часов, если на звено смотреть сверху [6]. При совпадении меток 1 всех звеньев ротор должен собираться.

Расстояния между плоскостями измерений биений $\Gamma_1 - \Gamma_5$ сведены в табл. 1. Они необходимы для расчета характеристик пар.

3. Сущность и задачи экспериментов.

Эксперимент 1. Для оценки предположения об образовании кинематических пар пятого класса роторный

пакет собирается четыре раза. При этом звенья 1 и 3 не меняют взаимного положения в роторном пакете, а звено 2 поворачивается относительно этих звеньев по ходу стрелки часов, если смотреть сверху, на 0° , 90° , 180° , 270° , в зависимости от номера сборки.

После каждой такой сборки определяются биения паспортных и технологических контрольных поверхностей роторного пакета, определяющих положение звеньев в роторном пакете. Затем рассчитываются характеристики пар программой, составленной по результатам работы [6]. Поскольку для определения характеристик пар ротор достаточно собрать два раза, то по сборкам 1 и 3 характеристики определяются, а по сборкам 2, 4 оценивается точность определения характеристик пар.

Эксперимент 2. Для оценки пригодности выбранных контрольных поверхностей для определения положений звеньев в роторном пакете на секцию 1..4 ст. последовательно устанавливается колесо 5 ст. с поворотами на 0° , 90° , 180° , 270° , в зависимости от номера соединения. После каждой такой сборки роторный пакет устанавливается в центрирующее приспособление секцией 1..4 ст., центрируясь по поверхности Γ_1 с прижимом к поворотному столу нижней торцевой поверхностью секции. Затем измеряются биения контрольных поверхностей $\Gamma_1 - \Gamma_5$, $T_1 - T_5$. Оценивается влияние на биения поверхностей Γ_4 и T_4 натяга в окрестности поверхности Γ_4 рабочего колеса 5 ступени. Также оценивается картина биений других контрольных поверхностей, а именно – меняются ли эти биения в зависимости от установки барабана и условий проведения замеров биений.

4. Проведение эксперимента 1.

Биения контрольных поверхностей по эксперименту 1 занесены в табл. 2, а в табл. 3 занесены эталонные биения технологических контрольных поверхностей (при имитации идеальной установки дисков в роторный пакет) и радиусы контрольных поверхностей.

По результатам измерений были дважды найдены характеристики первой и второй пары – по сборкам 1, 3 и 2, 4 соответственно. Для этого алгоритмы работы [6] были модернизированы для вычисления характеристик пар при повороте звеньев на углы, кратные 90° . Ниже приводится алгоритм расчетов.

Таблица 1

Расстояния между плоскостями измерений биений $\Gamma_1 - \Gamma_5$

Обозначение	l_1	l_2	l_3	l_4
Величина, мм	56	52	79	46

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НОВЫХ ПРОЦЕССОВ, МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ

Таблица 2

Биения контрольных поверхностей роторного пакета по эксперименту 1, мм

Пов-ть № сборки	Г ₅		Г ₅		Г ₁		Г ₄	
	Δ ₃₁	Δ ₄₁	δ ₃₁	δ ₄₁	Δ ₃₁	Δ ₄₁	δ ₃₁	δ ₄₁
1 (0°)	-0,08	-0,04	-0,07	-0,04	0,33	-0,24	-0,07	0,22
2 (90°)	-0,03	-0,17	-0,08	-0,08	0,02	-0,47	0,14	0,24
3 (180°)	0,09	-0,11	-0,05	-0,09	-0,23	-0,18	0,17	0,03
4 (270°)	0,04	0,01	-0,03	-0,07	0,08	0,06	-0,04	0,01

Таблица 3

Эталонные характеристики дисков, радиусы контрольных поверхностей

Контрольная поверхность	Г ₄			Г ₅		
	δ ₃₁	δ ₄₁	r ₄	δ ₃₁	δ ₄₁	r ₅
Величина, мм	-0,04	-0,05	335	-0,05	-0,03	341

I. Ввод расчетных данных.

1.1. N = 3 – количество звеньев.

1.2. $P = \begin{pmatrix} m_1 & n_1 \\ m_2 & n_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$ – матрица,

задающая способ образования s = (N-1) пар,

перечислением соединяемых звеньев пары n_s и m_s.

1.3. $L_s = \begin{pmatrix} 0 \\ -233 \end{pmatrix}$ – расстояние в мм между

плоскостями измерения радиальных биений звена n_s и звена m_s в паре s (рис. 1, табл. 1).

1.4. Δ_{3,j}^(k), Δ_{4,j}^(k), δ_{3,j}^(k), δ_{4,j}^(k), /k=1, N; j=0,1,...,4/ – координаты (биения) звена k: эталонные – j; в роторном пакете после сборки номер j = 1, ..., 4 (табл. 2, 3). По условию идеальной установки звена 1 Δ_{3,j}⁽¹⁾ = Δ_{4,j}⁽¹⁾ = δ_{3,j}⁽¹⁾ = δ_{4,j}⁽¹⁾ = 0, /j=0,1,...,4/.

1.5. r_k, /k=2, N/ – радиус, на котором измеряется торцевое биение звена k (табл. 3).

1.6. {φ_{s,j}} = $\begin{pmatrix} 0 & 90 & 180 & 270 \\ 0 & -90 & -180 & -270 \end{pmatrix}$ – относи-

тельные углы поворотов звена относительно звена в паре s в сборках роторного пакета, в градусах.

II. Расчет характеристик пар.

2.1. $e_j^{(k)} = -\frac{1}{2} [\Delta_{3,j}^{(k)} - \Delta_{3,0}^{(k)} + i(\Delta_{4,j}^{(k)} - \Delta_{4,0}^{(k)})]$,

δ_j^(k) = δ_{3,j}^(k) - δ_{3,0}^(k) + i(δ_{4,j}^(k) - δ_{4,0}^(k)), /k=2, N; j=1, ..., 4/ – эксцентриситет и перекоз звена k в роторном пакете относительно его собственной системы координат последней сборки;

2.2. $\tilde{e}_j^{(n_s)} = e_j^{(n_s)} e^{-i\varphi_{s,j}} - e_j^{(m_s)} - \frac{L_s}{2r_{m_s}} \delta_j^{(m_s)}$,

$\tilde{\delta}_j^{(n_s)} = \delta_j^{(n_s)} e^{-i\varphi_{s,j}} - \delta_j^{(m_s)}$, /s=1, N-1; j=1, ..., 4/ – эксцентриситет и перекоз звена n_s относительно звена m_s в системе координат звена m_s после j-ой сборки;

2.3. $ecp_s^{(q)} = \frac{\tilde{e}_q^{(n_s)} + \tilde{e}_{q+2}^{(n_s)}}{2}$, $\Delta e_s^{(q)} = \frac{\tilde{e}_q^{(n_s)} - \tilde{e}_{q+2}^{(n_s)}}{2} \cdot e^{i\varphi_{s,2q-1}}$,

$\delta cp_s^{(q)} = \frac{\tilde{\delta}_q^{(n_s)} + \tilde{\delta}_{q+2}^{(n_s)}}{2}$, $\Delta \delta_s^{(q)} = \frac{\tilde{\delta}_q^{(n_s)} - \tilde{\delta}_{q+2}^{(n_s)}}{2} \cdot e^{i\varphi_{s,2q-1}}$

– характеристики пары s, /s=1, N-1/, вычисленные по результатам 1, 3 – q = 1 и 2, 4 – q = 2 сборкам роторного пакета.

Результаты расчета сведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики пар, ×0,01 мм

№ сборок	ecp ₁ ^(q)	Δe ₁ ^(q)	δcp ₁ ^(q)	Δδ ₁ ^(q)	ecp ₂ ^(q)	Δe ₂ ^(q)	δcp ₂ ^(q)	Δδ ₂ ^(q)
1, 3 (q = 1)	4,25 -1,75·i	0,25 +3,75·i	-1 +2,5·i	-2 -1,5·i	-14,43 -2,76·i	-7,09 +13,1·i	-10 +11·i	11 +13·i
2, 4 (q = 2)	4,5 -1,75·i	0,25 +4·i	-0,5 +2,5·i	-1,5 -2,5·i	-13,51 -3,35·i	-7,17 +12,85·i	-10 +11,5·i	10,5 +13·i

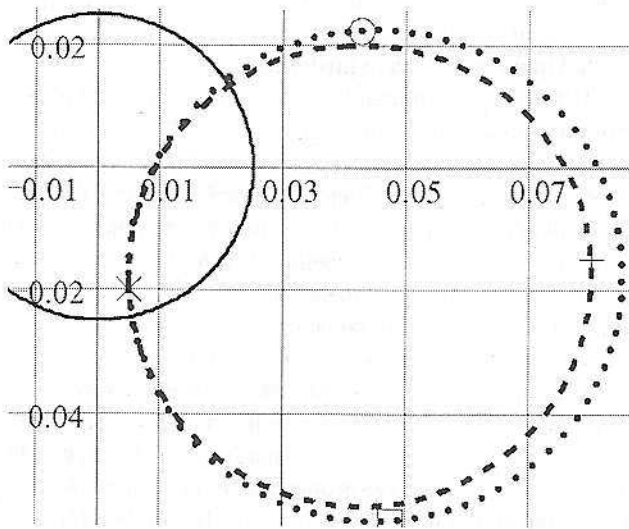
Характеристики пар задают законы изменения эксцентриситета и перекоса контрольных поверхностей звена n_s относительно идеально установленного звена m_s в паре s . Эти законы имеют вид

$$e_{n_s}^{(q)}(\varphi_s) = e c p_s^{(q)} + \Delta e_s^{(q)} e^{-i\varphi_s},$$

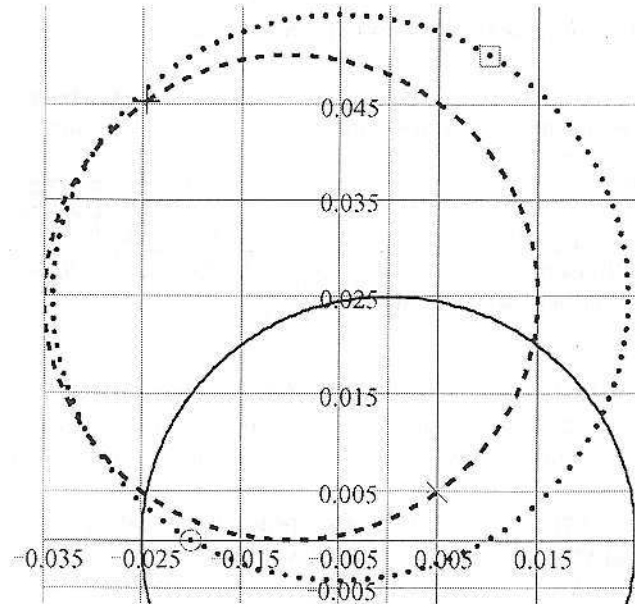
$$\delta_{n_s}^{(q)}(\varphi_s) = \delta c p_s^{(q)} + \Delta \delta_s^{(q)} e^{-i\varphi_s}, \varphi_s \in [0, 2\pi), s, q = 1, 2. (1)$$

На рис. 2 показаны графики характеристик пар.

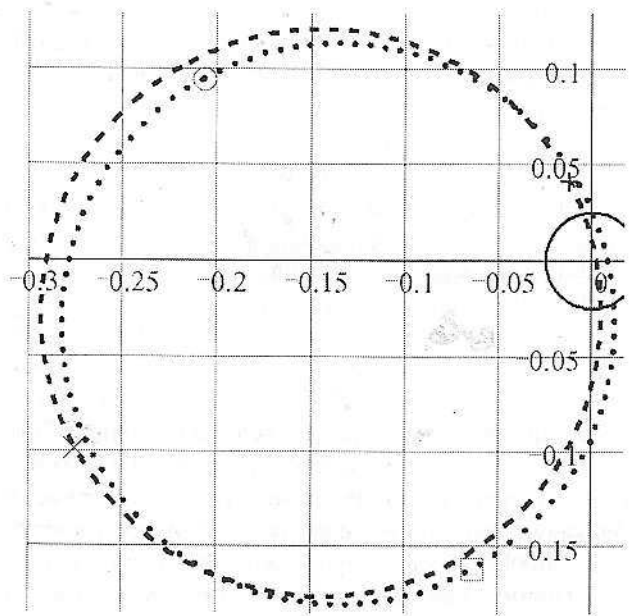
Для оценки предположения об образовании пар вычислялись наибольшие относительные расхождения характеристик пар в процентах по формулам:



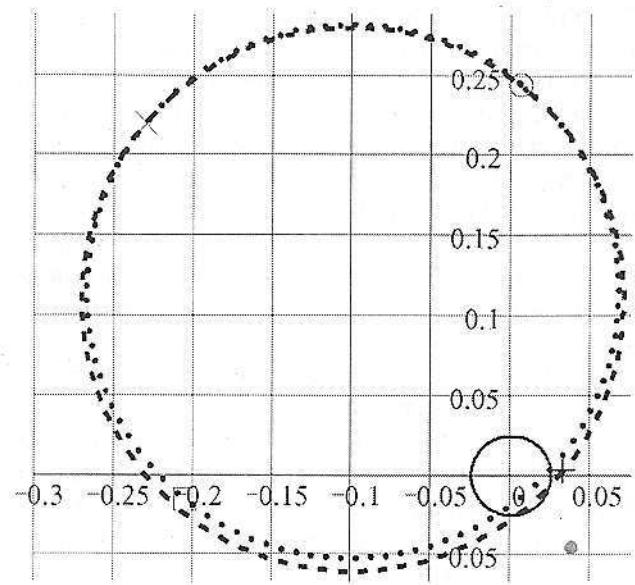
а



б



в



з

- ... — характеристика, построенная по сборкам 1,3;
- — характеристика, построенная по сборкам 2,4;
- — ограничения на эксцентриситет или перекоп;
- точки на графиках: % — 0°; + — 90°; ◻ — 180°; × — 270°

Рис. 2. Оценка точности определения характеристик пар

$$\eta_s \% = \frac{\max_{\varphi_s \in [0, 2\pi]} |e_{n_s}^{(1)}(\varphi_s) - e_{n_s}^{(2)}(\varphi_s)|}{2 \min \{|\Delta e_s^{(1)}|, |\Delta e_s^{(2)}|\}} \cdot 100\%,$$

$$\mu_s \% = \frac{\max_{\varphi_s \in [0, 2\pi]} |\delta_{n_s}^{(1)}(\varphi_s) - \delta_{n_s}^{(2)}(\varphi_s)|}{2 \min \{|\Delta \delta_s^{(1)}|, |\Delta \delta_s^{(2)}|\}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Результаты вычислений занесены в табл. 5.

Таблица 5
Наибольшие относительные расхождения характеристик пар в процентах

Величина	$\eta_1\%$	$\mu_1\%$	$\eta_2\%$	$\mu_2\%$
Погрешность, %	6,7	10	4,6	4,6
Диаметр минимальной окружности, мм	0,075	0,05	0,29	0,30

Из графиков на рис. 2 и табл. 5 следует, что:

- при стыковке двух звеньев ротора образуется объект, близкий по характеристикам к кинематической паре 5-го класса;

- относительная ошибка определения характеристик пар уменьшается с увеличением переменных составляющих характеристик пар ($\Delta e_s, \Delta \delta_s$).

Характеристики второй пары (рис. 2, в, з) показывают на существование проблемы, вызванной неудачной попарной пригонкой звеньев 2, 3 (на заводе изготовителе). В ее результате биения контрольных поверхностей звена 3 при условном повороте относительно звена 2 могут превышать предельно допустимые значения более чем в 10 раз. При этом существует единственный угол поворота звена 3 относительно звена 2, кратный 10° ($\varphi_2 = 100^\circ$ – в окрестности точек «+» на рис. 2, в, з), при котором значительные неточности изготовления посадочных поверхностей звена 2 практически полностью компенсируются аналогичными неточностями звена 3. Это значительно уменьшает количество приемлемых вариантов сборки ротора. Для сравнения звенья 1, 2 первой пары могут быть соединены с приемлемым качеством в 6-и различных положениях ($270^\circ, 280^\circ, \dots, 320^\circ$ – окрестности точек «x» на рис. 2, а, б).

Теоретически возможно, что некоторые образуемые пары будут иметь неприемлемые характеристики, не позволяющие собрать ротор с требуемым качеством. Это позволяет поставить такие новые задачи, связанные с анализом характеристик пар:

- 1) выделение бракованных пар;
- 2) выработка рекомендаций по исправлению характеристик пар путем дополнительной обработки стыковочных поверхностей (аналог попарной пригонки).

При решении второй задачи целесообразно детали не просто подгонять одна под другую – для возможности качественного соединения в единственном положении, а при этом улучшать характеристики образуемой пары путем уменьшения ее параметров $escr_s, \Delta e_s, \delta cr_s, \Delta \delta_s$, что позволит соединять две детали с приемлемым качеством в ряде положений и увеличит число приемлемых вариантов сборки ротора.

5. Проведение эксперимента 2.

При измерении биений было установлено, что биения контрольных поверхностей $\Gamma_1 - \Gamma_3$ и $\Gamma_1 - \Gamma_4$ практически не меняются от номера сборки и наибольшие расхождения в величинах биений не превышают $\pm 0,005$ мм. Это говорит о пригодности указанных поверхностей для определения положения звеньев в роторном пакете (и о качественном изготовлении центрирующего приспособления, позволяющего одинаково устанавливать секцию 1..4 ст. на поворотное контрольное устройство).

Была выявлена зависимость биений контрольной поверхности Γ_4 от номера соединения двух звеньев (табл. 6).

Из табл. 6 видно, что стыковка колеса 5 ст. с секцией 1..4 ст. приводит к деформациям ближайшей к месту стыковки контрольной поверхности Γ_4 , причем биения изменяются до 33% от величины предельно допустимых биений (0,06 мм). Поскольку секция 1..4 ст. закрепляется в контрольном поворотном устройстве одинаково, то изменение биений говорит о том, что нарушается связь между контрольной поверхностью и главными центральными осями инерции этого звена. Поэтому расположение контрольной поверхности Γ_4 выбрано неудачно.

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие основные выводы, касающиеся роторов барабанно-дисковой конструкции:

- 1) при стыковке двух звеньев ротора с возможностью условного поворота одного звена относительно другого образуется объект, близкий по характеристикам к кинематической паре 5-го класса, типа цилиндрический шарнир;
- 2) характеристики образуемых пар можно определять экспериментально – путем двух пробныхборок ротора с последующими измерениями положений звеньев в роторном пакете и проведением соответствующих расчетов;
- 3) анализом характеристик пар можно выделять бракованные пары и выработать рекомендации по улучшению их характеристик;

Таблица 6
Биения контрольной поверхности Γ_4 роторного пакета по эксперименту 2, мм

№ сборки	Без колеса 5 ст.		1 (0°)		2 (90°)		3 (180°)		4 (270°)	
	Δ_{31}	Δ_{41}	Δ_{31}	Δ_{41}	Δ_{31}	Δ_{41}	Δ_{31}	Δ_{41}	Δ_{31}	Δ_{41}
Γ_4 , мм	0	-0,01	0,01	-0,01	0,01	0	0,02	0,01	-0,01	0

4) на точность определения характеристик пар могут влиять деформации контрольных поверхностей ротора, вызванные стыковкой звеньев ротора, что является следствием неудачного конструктивного расположения контрольных поверхностей, а не недостатком метода двух пробных сборок ротора.

Литература

1. ОСТ 1.41185-72 "Ротор компрессора с дисками, имеющими торцевые зубья. Типовой технологический процесс сборки ротора".

2. ОСТ 1-76086-71 "Прибор для определения оптимального положения дисков при сборке ротора компрессора".

3. Непомилуев В.В. Разработка технологических основ обеспечения качества сборки высокоточных узлов газотурбинных двигателей / Дисс. ... докт. техн. наук. — Рыбинск: РГАТА, 2000. — 356 с.

4. Кондратюк Э.В., Титов В.А., Филимонович Г.Б. Учет коробления и неточности изготовления деталей при прогнозировании результатов сборки роторов ГТД // Вестник двигателестроения. — 2005. — №1. С. 61—68.

5. Кондратюк Э.В., Титов В.А., Филимонович Г.Б. Сборка ротора барабанно-дисковой конструкции методом двух пробныхборок // Технологические системы. — 2005. — №1. — С. 30—34.

6. Кондратюк Э.В. Сборка ротора КВД газотурбинного двигателя Д-18Т методом двух пробныхборок и последовательной оптимизации // Технологические системы. — 2005. — №2. — С. 10—16.

7. Кондратюк Э.В., Филимонович Г.Б. Сборка ротора КВД газотурбинного двигателя Д-18Т методом двух пробныхборок полной оптимизации // Технологические системы. — 2005. — № 4 (30). — С. 9—14.

8. ОСТ 1.4167-77 "Статическая балансировка роторов ГТД путем распределения лопаток в дисках. Метод анализа".

УДК 621.762.4.047: 539.4.01

Отрок А.И.

ГП "Финмаш". Украина, г. Киев

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И МЕХАНИЗМ ФРАГМЕНТИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ

Сообщение 2. Структурные и энергетические показатели деформации

Анотація

Проведено аналіз енергетичних показників пластичної деформації порошкового заліза при прокатуванні і дроту при волочінні. Розкрито механізм утворення критичних мікротріщин та розраховано їх довжину. Розраховано роботу деформації структурних елементів, відповідальних за опір деформації всього матеріалу, без урахування енергії, що витрачається на розігрів матеріалу.

Abstract

There was conducted the analysis energetic indexes of powdered iron plastic deformation at rolling and wire at drawing. There was explored the mechanism of critical microcracks creation and their length was calculated. There was calculated the work of structural elements deformation responsible for resistance to deformation of the whole material, not taking into consideration the energy consumed for the heating of the material.

Определение структурных параметров при прокатке железного порошка

Полученные в [1] соотношения позволяют оценить дисперсность структурных элементов объема при прокатке железного порошка (без упрочняющих включений).

Прокат получен в валках $\varnothing 172,8$ мм при окружной скорости 0,027 м/с и различных давлениях прокатки P_{\max} в диапазоне от начала формирования образцов (пригодных для дальнейшего исследования) до образования трещин на лентах. Средняя ширина лент — 45 мм. Толщина проката составляла от 1,53 до 0,72 мм. Шероховатость поверхности валков — не выше 2,5 мкм. Насыпная плотность железного порошка в состоянии поставки 2,82 г/см³, исходная дисперсность частиц порошка

$$\left(\frac{S}{V}\right)_M^{(0)} = 1,3 \frac{M^2}{\text{см}^3}, \text{ плотность дислокаций, рассчитанная}$$

по истинному физическому уширению интерференционных максимумов, $\rho_M^{(0)} = 2,26 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$. Высокая плотность дислокаций обусловлена технологией изготовления порошка марки ПЖИМ2 (размол восстановленной губки).

Для плоского напряженного состояния в нейтральном сечении очага деформации, где давление прокатки достигает максимального значения, а $\sigma_3 = 0$ и $\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}$, эффективное напряжение сдвига металла частиц в контактах равно октаэдрическому касательному напряжению: