

TEXHOJOFNYECKASI MEXAHMKA

УДК 539.3

В.Е. АНТОНЮК, д-р техн. наук

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Сформулированы основные требования и даны зависимости по расчету режима нагружения для осуществления процесса динамической стабилизации. Приводятся результаты использования выполненных расчетов при внедрении процесса динамической стабилизации для изготовления фрикционных дисков. Даны рекомендации по дальнейшему использованию динамической стабилизации при изготовлении деталей машиностроения

Ключевые слова: циклическое нагружение, петля гистерезиса, фрикционные диски, динамическая стабилизация, установка, циклограмма, исправляемость, ресурс

Введение

Динамическая стабилизация основана на том, что при нагружении детали знакопеременной циклической нагрузкой происходит стабилизация геометрической формы детали относительно оси или плоскости приложения знакопеременной нагрузки.

Отечественное машиностроение отстает от зарубежного по разработке и применению современных процессов с использованием циклического нагружения в технологических процессах изготовления различных леталей.

В качестве физической основы динамической стабилизации используется явление гистерезиса в области упругопластического деформирования, и для теоретического обоснования процесса динамической стабилизации использованы базовые уравнения кривой петли гистерезиса. Стабилизация механических свойств материалов и снижение остаточных напряжений при циклическом знакопеременном нагружении в зоне упругопластических деформаций достаточно управляемы при целенаправленном воздействии на динамику изменения ширины петли гистерезиса [1, 2].

Для динамической стабилизации необходимо создание в материале деталей упругопластических деформаций и напряжений, которые приводят к возникновению петли гистерезиса, циклический характер нагружения происходит в переходной зоне между мало- и многоцикловой усталостной прочностью. Исследования свойств материалов в этой зоне отмечают положительное влияние циклического нагружения на снижение остаточных напряжений, упрочнение материала и на дальнейшую работоспособность материалов и деталей [3—7].

Для целенаправленного использования циклического нагружения при изготовлении конкретных деталей необходимы разработки инженерных методик выбора и расчета режимов нагружения для осуществления динамической стабилизации.

Циклограмма нагружения и основные расчетные положения

Зависимости между напряжениями и деформациями при циклическом нагружении определяют циклическими диаграммами деформирования. Ширина петли упругопластического гистерезиса является важнейшей характеристикой, определяющей эффективность циклического деформирования. Стабилизация ширины петли гистерезиса принята в качестве критериального фактора динамической стабилизации. Для описания поведения петли гистерезиса используются диаграммы статического и циклического деформирования, которые строятся по результатам испытаний материалов в соответствии с ГОСТ 25.502-79 и ГОСТ 1497-84 [8, 9].

Исходное нагружение происходит в соответствии с диаграммой статического нагружения по линии ОАС в координатах σ —e (рисунок 1 a). Исходное нагружение и разгрузка образуют нулевой полуцикл цикл нагружения (k=0).

Дальнейшее реверсивное нагружение происходит по отдельным линиям деформирования до точек K или N в зависимости от степени исходного деформирования. Для удобства описания упругопластических деформаций при различных значениях исходного деформирования используется обобщенная диаграмма упругопластического деформирования, которая применима для всех конструкционных материалов и строится в относительных координатах $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$ [10]. Построение обобщенной диаграммы упругопластического деформирования представ-

лено на рисунке 1 б и заключается в совмещении точек начала разгрузки А и С для всех циклов нагружения.

Для выполнения расчетов, связанных с определением напряжений и деформаций в области упругопластического деформирования, используются значения относительных напряжений и деформаций, когда все напряжения и деформации отнесены соответственно к деформации и напряжению предела пропорциональности в нулевом полуцикле:

$$\overline{arepsilon} = rac{arepsilon}{e_{nu}^{(0)}}, \ \overline{\delta} = rac{\delta}{e_{nu}^{(0)}}, \ \overline{\sigma} = rac{\sigma}{\sigma_{nu}^{(0)}}, \ \overline{S} = rac{S}{\sigma_{nu}^{(0)}}$$

где $e_{nu}^{(0)} = \frac{\sigma_{nu}^{(0)}}{F}$ — деформация, соответствующая пределу

пропорциональности $\sigma_{nu}^{(0)}$.

В общем виде аналитическое описание диаграммы циклического деформирования в упругопластической области выше предела пропорциональности может быть представлено в виде [11]:

$$\overline{\varepsilon}^{(k)} = \overline{S}^{(k)} + \overline{\varepsilon}_{n}^{(k)}, \tag{1}$$

где $\overline{S}^{(k)} = \frac{S^{(k)}}{\sigma^{(0)}_{\dots}}$ — относительный циклический предел про-

порциональности для симметричного цикла нагружения

при k-м полуцикле нагружения; $\overline{\varepsilon}_p^{(k)} = \frac{\varepsilon_p^{(k)}}{e^{(0)}}$ — степень пла-

стической деформации на уровне напряжения $\overline{S}^{(k)}$.

Приближенно ширина петли гистерезиса равна пластической деформации:

$$\overline{\delta}^{(k)} \approx \overline{\varepsilon}_{n}^{(k)},$$
 (2)

И

$$\overline{\varepsilon}^{(k)} = \overline{S}^{(k)} + \overline{\delta}_p^{(k)}. \tag{3}$$

По результатам экспериментальных данных ширина петли гистерезиса при малоцикловом нагружении может быть представлена для упрочняющихся, разупрочняющихся и стабилизирующихся материалов в виде зависимости [12]:

$$\overline{\delta}^{(k)} = \overline{\delta}^{(1)} \cdot F(k), \tag{4}$$

где $\overline{\delta}^{(1)}$ — ширина петли в первом полуцикле; $F(k) = \frac{1}{k^{\alpha}}$ — для упрочняющихся материалов; $F(k)=e^{\beta(k-1)}$ — для разупрочняющихся материалов, где е — основание натурального логарифма.

Параметры α и β характеризуют интенсивность изменения ширины петли гистерезиса и зависят от степени исходного пластического деформирования в нулевом полуцикле. Для циклически упрочняющихся и разупрочняющихся материалов соответственно [12]:

$$\alpha = B(\bar{\sigma}^{(0)} - 1),\tag{5}$$

$$\beta = C(\overline{e}^{(0)} - 1), \tag{6}$$

где $\overline{e}^{(0)}$ — относительная исходная деформация, прини-

мается в пределах 5...10;
$$C = K_c \left(\frac{1}{1 - \sigma_{0,2} / \sigma_B} - 2 \right)$$
для разуп-

рочняющихся сталей при $K = 1.5 \cdot 10^{-3}$

Ширина петли гистерезиса в первом полуцикле $\delta^{\scriptscriptstyle (1)}$ определяется относительной исходной деформацией [12]: $\overline{\delta}^{\text{(1)}} = A \cdot (\overline{e}^{\text{(0)}} - 1), \tag{7}$

$$\overline{\delta}^{(1)} = A \cdot (\overline{e}^{(0)} - 1). \tag{7}$$

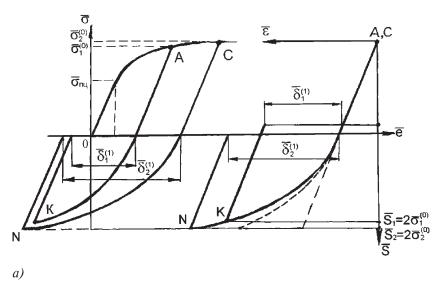
и для большинства конструкционных сталей с пределом прочности $\sigma_{_{B}}$ =450...1350

$$A = k_A \left(1 + \frac{1}{1 - \sigma_{0.2} / \sigma_B} \right)$$
 M $k_A = 0.16$.

Зная основные характеристики материала, можно определить ширину петли гистерезиса в первом полуцикле нагружения, после чего можно перейти к описанию процесса упругопластического деформирования через закономерности изменения ширины петли при последующих циклах нагружения.

В упрощенной форме циклограммы нагружения для осуществления динамической стабилизации можно представить в виде трех участков (рисунок 2): A — роста нагрузки, C — выдержки при постоянной нагрузке, B — уменьшения нагрузки.

При выборе циклограммы нагружения можно воспользоваться рекомендациями, которые представлены в виде зависимости достигаемой исправляемости от уровня и числа циклов нагружения (рисунок 3 а) и для различных материалов (рисунок 3 δ) [1].



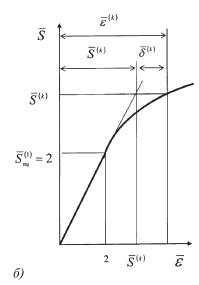


Рисунок 1 — Построение обобщенной диаграммы упругопластического деформирования в координатах $\bar{\sigma} - \bar{e}$ (a), в координатах $S - \bar{\varepsilon}$ (б)

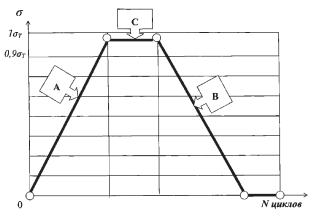
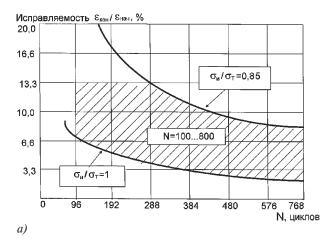


Рисунок 2 — Циклограмма динамической стабилизации

На участке роста нагрузки А интенсивность нагружения зависит от технических возможностей устройства для осуществления динамической стабилизации. В реализованных устройствах на участке А обеспечивалось достижение уровня напряжений 0,95...1,0 σ_{τ} за 100...150 циклов и интенсивность нагружения составляла 6...10 МПа на один цикл нагружения.

Участок постоянной нагрузки C находится в зоне предела текучести $\sigma_{\scriptscriptstyle T}$ и на этом участке для разупрочняющихся материалов происходит увеличение ширины петли гистерезиса с каждым циклом нагружения. Поэтому количество циклов нагружения на этом участке сле-



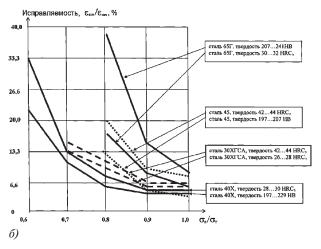


Рисунок 3 — Исправляемость после динамической стабилизации в зависимости от материала (а) и в зависимости от уровня нагружения (δ)

дует назначать с учетом характеристик материала, влияющих на изменение ширины петли. По результатам исследования динамической стабилизации сталей марок 45, 40X, 65 Γ и 30X Γ CA на участке C необходимо осуществление не менее 20 и не более 200 циклов нагружения. Ширина петли гистерезиса в конце участка C достигает максимального значения:

$$\overline{\delta}^{(K_C)} = \overline{\delta}^{(1)} \cdot e^{\beta(K_C - 1)}. \tag{8}$$

Участок уменьшения нагрузки В должен обеспечить уменьшение ширины петли гистерезиса, что является главным условием динамической стабилизации. Это условие может быть выражено как требование достижения максимальной ширины петли на участке C с последующим уменьшением ширины петли на участке В:

$$\delta^{(K_B)} < \delta^{(K_C)} \,. \tag{9}$$

Для циклически упрочняющихся материалов условие уменьшения ширины петли гистерезиса от участка C к участку B можно представить как:

$$\frac{1}{\left(K_C + K_B\right)^{\alpha}} \le \frac{1}{\left(K_C\right)^{\alpha}}.\tag{10}$$

Из зависимости (10) значение $\delta^{(K_B)}$ всегда будет меньше $\delta^{(K_C)}$, циклограмма для упрочняющихся материалов может назначаться с участком уменьшения нагрузки В, равным участку роста нагрузки А. Число циклов нагружения $K_{R} = K_{A}$. В этом случае всегда будет происходить уменьшение ширины петли, что обеспечивает выполнение требования (9).

Для циклически разупрочняющихся материалов ширина петли в k-м цикле нагружения равна:

$$\overline{\delta}^{(k)} = \overline{\delta}^{(1)} \cdot e^{\beta(k-1)} \tag{11}$$

При каждом последующем цикле нагружения ширина петли будет увеличиваться так, как это представлено на рисунке 4 а. Условие стабилизации может быть выражено как требование уменьшения ширины петли при каждом последующем цикле нагружения (рисунок 4 δ):

$$\overline{\delta}^{(k+1)} \le \overline{\delta}^{(k)}. \tag{12}$$

Далее на участке B за счет уменьшения напряжения за каждый цикл нагружения на величину $\Delta \overline{S} = \overline{S}^{(k)} - \overline{S}^{(k+1)}$ будет происходить уменьшение ширины петли на величину $\Delta \overline{\delta} = \overline{\delta}^{(k)} - \overline{\delta}^{(k+1)}$.

Для выполнения требования динамической стабилизации необходимо на участке B в диапазоне действия упруго-пластической деформации привести достигнутую ширину петли в конце участка C как минимум в исходное положение при первом полуцикле нагружения $ar{\delta}^{({\scriptscriptstyle I})}$ и как максимум — в нулевое положение. Тогда требуемое уменьшение петли равно:

$$\Delta \overline{\delta} \cdot {}^{(\Sigma)} = \overline{\delta}^{(K_C)} - \overline{\delta}^{(1)}, \ \Delta \overline{\delta} \quad {}^{(\Sigma)} = \overline{\delta}^{(K_C)}. \tag{13}$$

 $\Delta \overline{\delta}_{\min}^{(\Sigma)} = \overline{\delta}^{(\mathcal{K}_C)} - \overline{\delta}^{(l)}, \ \Delta \overline{\delta}_{\max}^{(\Sigma)} = \overline{\delta}^{(\mathcal{K}_C)}.$ (13) Необходимое количество циклов нагружения на участке B в диапазоне напряжений от $\overline{S}^{(k_C)}$ до \overline{S}_{nu} для достижения минимального значения ширины петли равно:

$$k_{\scriptscriptstyle B} = \frac{\Delta \overline{\delta}^{(\Sigma)}}{\Delta \overline{\delta}}.\tag{14}$$

В результате определяется относительная интенсивность падения напряжений на участке В по зависимости:

$$\Delta \bar{\sigma}^{(B)} = \frac{\left(\bar{\sigma}^{(C)} - \bar{\sigma}_{n_{\mathcal{U}}}\right)}{k_{_{B}}},\tag{15}$$

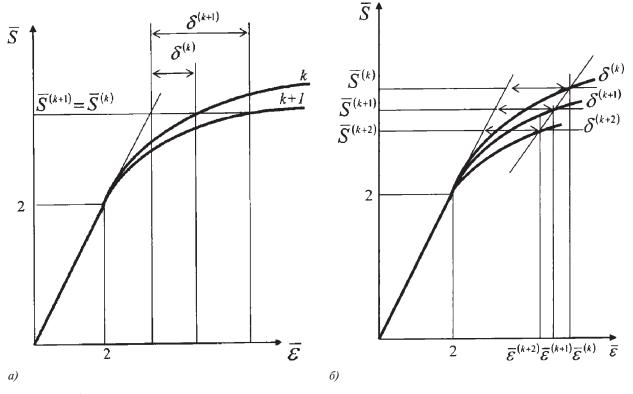


Рисунок 4 — Диаграмма упругопластического деформирования разупрочняющихся материалов при увеличивающейся петле гистерезиса (a), при уменьшающейся петле гистерезиса (б)

где $\overline{\sigma}^{(C)}$ — относительные напряжения, действующие на участке C и тогда $\Delta \sigma^{(B)} = \Delta \overline{\sigma}^{(B)} \cdot \sigma_{nu}$ в МПа.

По величине изменения напряжения за 1 цикл $\Delta \bar{\sigma}_{B}$ находим суммарное число циклов нагружения на участке B:

$$k_B = \frac{\overline{\sigma}^{(C)}}{\Delta \overline{\sigma}^{(B)}} = \frac{\sigma^{(C)}}{\Delta \sigma^{(B)}}.$$
 (16)

Суммарное количество циклов нагружения будет равно:

$$N_{u} = K_{A} + K_{C} + K_{B} + K_{0}, (17)$$

где K_A , K_C , K_B и K_0 — соответственно количество циклов на участках A, C и B и при нулевой нагрузке.

Суммарное количество циклов может назначаться в пределах от 100 до 800 циклов при использовании интенсивного режима нагружения и до 1200 циклов при использовании оптимального режима нагружения [1].

Расчет силовых параметров динамической стабилизации

Окончательным этапом расчета режима динамической стабилизации фрикционных дисков является расчет силовых режимов нагружения по выбранной циклограмме (рисунок 5) [13]. Расчет силовых режимов нагружения включает определение требуемых величин перемещений и усилий для осуществления процесса, а также рассчитывается доля использования ресурса работоспособности на осуществление процесса динамической стабилизации (таблица 1).

Для выполнения этих расчетов разработано программное обеспечение [14]. В исходные данные программного расчета режимов динамической стабилизации вводятся параметры фрикционного диска, материла и расчетной циклограммы (таблица 2).

В окончательном виде режимы нагружения для фрикционного диска оформляются в виде таблицы 3, которые вводятся в систему ЧПУ устройства для осуществления динамической стабилизации для различных состояний диска.

Процесс динамической стабилизации внедрен при изготовлении фрикционных дисков многодисковых маслоохлаждаемых тормозов (ММОТ) карьерных самосвалов БелАЗ. Выбор схемы нагружения и расчет напряженного состояния фрикционных дисков в процессе динамической стабилизации приведен в публикациях [15—16].

С учетом требований к фрикционным дискам MMOT разработана технологическая концепция изготовления фрикционных дисков и создана принципиально новая конструкция установки с ЧПУ для динамической стабилизации [17—18].

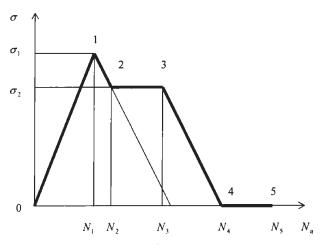


Рисунок 5 — Рабочая циклограмма

Таблица 1 — Расчет использования ресурса работоспособности на осуществление процесса динамической стабилизации

Исходные параметры расчета	Точки циклограммы								
Номер точки на циклограмме	1		2 3			4		5	6
Расчетное напряжение σ_{pac} , МПа $\sigma_{pac} = \frac{\sigma_T}{k}$	0		$\sigma_{\it pac}$	0,95 თ	pac	0,95 σ _{ρασ}	,	0	0
Расчетный прогиб f , мм $f_{\text{max}} = \frac{\sigma_{pac} l^2 W_x}{12 EJ_x}$	0	j	$f_{\rm max}$	$0,95 f_{_{\rm I}}$	nax	$0,95f_{ m max}$		0	0
Участки циклограммы	0-1		1—2			2—3		3—4	4_5
Принятое напряжение на участках циклограммы	$\sigma_{l} = \sigma_{pa}$	с	σ_2 =0,95 σ_{pac}		σ_2 =0,95 σ_{pac}			0	0
Расчетное количество циклов нагружения на каждом участке циклограммы	$N_{_{1}}=K_{_{ ho}}$ •	$\sigma_{_1}$	$N_2 - N_1 = K_{II}(\sigma_1 - \sigma_2)$		N ₃ -N ₂		N_4	$-N_3=K_p \cdot \sigma_2$	N ₅ -N ₄
Расчетная формула уровня усталостных повреждений на каждом участке циклограммы $\sigma_{npi}^m \cdot n_{npi}$	$\frac{\sigma_1^m \cdot N_1}{m+1}$		$\frac{\sigma_1^m \cdot (K_{II} \sigma_1)}{m+1}$ $\frac{\sigma_2 \cdot (K_{II} \sigma_2)}{m+1}$		σ_2^m	(N_3-N_2)	σ_2^m	$\frac{V \cdot (N_4 - N_3)}{m+1}$	0
Суммарный уровень усталостных повреждений на всех участках циклограммы	$\sum \sigma_{npi}^m \cdot n_{npi}$								
Общий ресурс	$\sigma^{\scriptscriptstyle{m}}_{\scriptscriptstyle{-1}}\!\cdot\! N_{\scriptscriptstyle{0}}$								
Доля использования ресурса на выполнение процесса динамической стабилизации	$a_{np} = rac{\sum \sigma_{npi}^m n_{npi}}{\sigma_{-1}^{m} N_0}$								

Технологическая концепция изготовления фрикционных дисков ММОТ заключается в том, что динамическая стабилизации дисков вводится на промежуточных стадиях технологического процесса для заготовки диска, для диска после предварительного шлифования и для окончательно обработанного диска.

Для реализации предложенной технологической концепции создана универсальная установка с ЧПУ для динамической стабилизации фрикционных дисков с размерами наружного диаметра от 580 до 915 мм (рисунок 6).

В результате внедрения динамической стабилизации для всех типоразмеров фрикционных дисков достигается отклонение от плоскостности не более 0,3 мм, в то время как по действующему технологическому процессу до 60 % дисков не достигали этого отклонения и для них вводилась дополнительная операция термоправки.

В таблице 4 приведены различные типы деталей и их схемы нагружения для осуществления процесса динамической стабилизации.

Заключение

1. Требования к современным конструкциям машин по снижению металлоемкости и повышению долговечно-

сти связаны с необходимостью изготовления деталей со стабильной геометрической формой, для чего целесообразно использование процесса динамической стабилизации на основе знакопеременного циклического нагружения.

- 2. Для целенаправленного использования динамической стабилизации разработана инженерная методика выбора и расчета режимов нагружения.
- 3. Предложенная методика опробована и реализована при разработке технологической концепции и при создании установки с ЧПУ для динамической стабилизации тормозных фрикционных дисков карьерных самосвалов.
- 4. Методика выбора и расчета циклограмм может быть использована для осуществления динамической стабилизации с целью повышения точности и работоспособности деталей типа дисков сцепления, фрикционных дисков, коленчатых валов, торсионных валов, труб, гильз и ряда других нежестких деталей.

Список обозначений

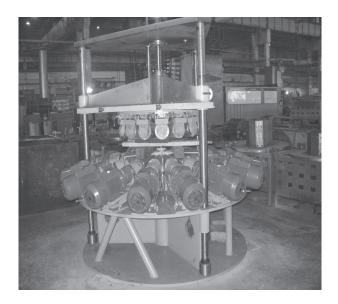
 $\sigma_{\!_B}-$ предел прочности по ГОСТ 1497-84; $\sigma_{_{T\!0,02}}-$ предел текучести, для пластической деформации 0,02 %;

7 Таблица 2 — Исходная информация для программного расчета режимов нагружения при динамической стабилизации фрикционных дисков

Параметры	Обозначение	Размерность
Исходные данные фрикционн	ного диска	
Материал диска		
Поверхностная твердость диска	HRC, HB	
Наружный диаметр	$D_{_{\scriptscriptstyle H}}$	MM
Внутренний диаметр	$D_{_{\scriptscriptstyle{ heta}}}$	MM
Толщина поперечного сечения	h	MM
Предел прочности	$\sigma_{_b}$	МПа
Предел текучести	$\sigma_{_T}$	МПа
Предел усталости	σ_1	МПа
Показатель уравнения кривой усталости	m	
Базовое число циклов нагружения	$N_{_0}$	
Модуль упругости	E	МПа
Модуль сдвига	G	МПа
Число роликов	n	
Расчет силовых параме	тров	
Ширина поперечного сечения кольца	b	MM
Расчетная длина	l	MM
Деформация максимальная под роликом	$f_{ m max}$	MM
Расчетное напряжение динамической стабилизации	$\sigma_{_{pac}}$	МПа
Принятое значение деформации под роликом	f	MM
Суммарная вертикальная сила перемещения верхних роликов	$\sum P$	Н
Угол «тарельчатости»	$\beta_{\it map}$	рад
Напряжение кручения	τ	Мпа
Суммарное напряжение	$\sigma_{_{\scriptscriptstyle {\it CYM}}}$	Мпа
Доля использования ресурса	a_{p}	

Таблица 3 — Режимы нагружения фрикционного диска

Точка циклограммы	Величина максимального	Номер диска 7555В—3502554—10				
	прогиба H , мм	Для заготовки	Для диска	Для окончательно		
	Количество N , циклов от начала процесса	диска	после чернового шлифования	изготовленного диска		
1	H, mm	0	0	0		
1	<i>N</i> , циклов	0	0	0		
2	H, mm	1,596	1,818	2,060		
	<i>N</i> , циклов	112	112	112		
3	H, mm	1,596	1,818	2,060		
	<i>N</i> , циклов	162	162	162		
4	Н, мм	0	0	0		
	<i>N</i> , циклов	354	354	354		
5	H, mm	0	0	0		
	<i>N</i> , циклов	400	400	400		





a)

Рисунок 6 — Установка для динамической стабилизации фрикционных дисков с наружными диаметрами до 950 мм: a) — рабочая зона, δ) — пульт управления

б)

 $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести, для пластической деформации 0,2~%;

 σ_{nu} — предел пропорциональности;

 $\sigma^{(0)}$ — напряжение, соответствующее исходной деформации;

 $S_{...}$ — циклический предел пропорциональности;

 $S^{(k)} =$ циклический предел пропорциональности при k-м полуцикле;

 $e^{(0)}$ — исходная деформация при статическом нагружении; $e_{n\mu}$ — деформация, соответствующая пределу пропорциональности $\sigma_{n\nu}$;

 $\varepsilon^{(k)}$ — деформация на уровне напряжения $S^{(k)}$;

 $arepsilon_p^{(k)}$ — пластическая деформация на уровне $S^{(k)}$ при k-м цикле;

 $\delta^{\scriptscriptstyle (1)}$ — ширина петли гистерезиса в первом цикле нагружения;

 $\delta\!(\mathbf{k})$ — ширина петли гистерезиса в k-м цикле нагружения;

 $m^{(0)}$ — показатель упрочнения материала;

E — модуль упругости;

 $\psi_{\scriptscriptstyle k}$ — относительное сужение;

k — число циклов нагружения.

Список литературы

- Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация геометрических параметров деталей знакопеременным нагружением. Минск: Технопринт, 2004. — 184 с.
- Антонюк, В.Е., Берестнев, О.В. Основные положения динамической стабилизации геометрических форм деталей / Докл. Нац. акад. наук Беларуси, 2005. — Т. 49, № 3. — С. 98—102.
- Екобори, Т. Физика и механика разрушения твердых тел / Т. Екобори; под ред. В.С. Ивановой; пер. с англ. — М.: Металлургия, 1971. — 264 с.

Таблица 4 — Область применения динамической стабилизации

Детали-представители	Особенности нагружения	Схема нагружения
Диски сцепления	Нагружение за счет разворота и вращения центральной части диска	
Фрикционные диски	Нагружение вращением диска между нижним и верхним рядом радиальных роликов	

Окончание таблицы 4

Детали-представители	Особенности нагружения	Схема нагружения
Венцы маховика, коронные шестерни	Нагружение вращающимися роликами по отверстию кольца	
Торсионные валы, буровые трубы	Нагружение изгибом с вращением	
Коленчатые валы	Нагружение изгибом с вращением вала	

- 4. Иванова, В.С. Синергетика разрушения и механические свойства / В.С. Иванова // Синергетика и усталостное разрушение: сб. ст. М.: Наука, 1989. С. 6—29.
- Трошенко, В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Т. Трощенко. — Киев: Наук. думка, 1981. — 344 с.
- Трощенко, В.Т. Прочность металлов при переменных нагрузках / В.Т. Трощенко. — Киев: Наук. думка, 1978. — 174 с.
- Guericke, W. Eisenbahntechnische Rundschau / W. Guericke. – 2001. – № 9. – P. 541–551.
- Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость: ГОСТ 25.502-79. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 34 с.
- МЕТАЛЛЫ. Методы испытаний на растяжение (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88): ГОСТ 1497-84. — М.: Изд-во стандартов, 1997. — 35 с.
- Гусенков, А.П. Свойства диаграмм циклического деформирования при нормальных температурах / А.П. Гусенков // Сопротивление деформир. и разрушению при малом числе циклов нагружения: сб. ст. М.: Наука, 1967. С. 34—63.
- 11. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, В.П. Гусенков. М.: Машиностроение, 1985. 223 с.
- Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н.А. Махутов. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

- Антонюк, В.Е. Расчет напряженного состояния деталей типа колец при совместном действии изгиба и кручения / В.Е. Антонюк, А.М. Гоман, В.С. Александрова // Материалы, технологии, инструменты. 2006. Т. 11, № 2. С. 32—38.
- 14. Антонюк, В.Е. Методические основы программного расчета режима нагружения при динамической стабилизации фрикционных дисков / В.Е. Антонюк, А.С. Скороходов, В.В. Рудый // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 2. С. 20—27.
- Антонюк, В.Е. Выбор конструкционных параметров и совершенствование технологии изготовления фрикционных дисков / В.Е. Антонюк // Тракторы и с.-х. машины. 2005. № 7. С. 45—47.
- 16. Антонюк, В.Е. Особенности технологии и оборудования для динамической стабилизации фрикционных дисков многодисковых маслоохлаждаемых тормозов / В.Е. Антонюк [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2008. № 4(5). С. 72—76.
- 17. Устройство для правки колец: патент BY (11) 4014 U 2007.12.30 МПК (2006) B 21B 1/10 / В.Е. Антонюк, О.В. Берестнев, Г.Я. Горячий, Ф.А. Домотенко, В.В. Рудый, А.А. Алексеенко, В.И. Зварыгин.
- Устройство для правки колец: патент BY (11) 5618 U 2009.10.30 МПК (2006) В 21В 1/10 / В.Е. Антонюк, Ф.А. Домотенко, В.В. Рудый, А.А. Алексеенко, В.И. Зварыгин.

Antoniuk V.E.

The dependence of the process of dynamic stabilization was calculated in the time of manufacture of mechanical engineering's details

The basic requirements are formulated and the basic settlement dependences by calculation of a mode of loading for realization of process of dynamic stabilization are given. Results of use of the executed calculations are resulted at introduction of process of dynamic stabilization for manufacturing frictional disks. Recommendations for further use of dynamic stabilization are given at manufacturing details of mechanical engineering.

Поступила в редакцию 15.03.2010