

ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.7

В.Е. АНТОНЮК, д-р техн. наук, проф.

главный научный сотрудник лаборатории металлургии в машиностроении НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»

E-mail: vladi@tut.by

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 01.11.2023.

ОБОСНОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАБИЛИЗАЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ

Обоснована необходимость стабилизации кольцевых заготовок малой жесткости. Для стабилизации предлагается 6-позиционная схема нагружения равномерно распределенными радиальными усилиями с возможностью трансформироваться в 3- и 2-позиционные схемы нагружения. Выполнен анализ напряженного состояния кольца при нагружении радиальными равномерно расположенными усилиями и предложены расчетные зависимости для определения суммарного напряжения при 6-, 3- и 2-позиционных схемах нагружения. Предложены расчетные зависимости для определения силовых параметров устройства с рычажно-шарнирным механизмом для создания в кольце напряжений на уровне условного предела текучести. По предлагаемой методике расчета силовых параметров приведен пример расчета для кольца из стали 40ХМФА с наружным диаметром 392 мм. Разработанные рекомендации могут быть использованы при создании устройств для стабилизации и снятия остаточных напряжений в кольцевых заготовках, которые необходимы для изготовления ответственных изделий в таких областях, как авто- и авиастроение, точное машиностроение, военная промышленность.

Ключевые слова: кольцевая заготовка, кольцо, напряженное состояние, стабилизация, радиальное усилие, рычажно-шарнирный механизм

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-30-35>

Введение. Современный уровень развития машиностроения требует повышения качества изделий при снижении металлоемкости, что расширяет использование деталей малой жесткости. Наиболее актуален вопрос изготовления изделий малой жесткости со стабильной формой и размерами без остаточных напряжений. При изготовлении деталей малой жесткости широко используются правки со статическим нагружением. Компания Galdabini (Италия) предлагает гамму устройств с ЧПУ для правки таких изделий автомобильной промышленности, как коленвалы, распределительные валы, вал-шестерни [1]. Все устройства компании Galdabini автоматизированы и работают по принципу: измерение погрешности

изделия, программный расчет места и величины прикладываемого усилия для правки, нагружение изделия в заданном месте расчетным усилием, измерение изделия после правки.

Вышеприведенные правки обеспечивают довольно высокую точность изделий, но по виду нагружения являются статическими и не снимают остаточных напряжений. Более перспективными являются правки с использованием знакопеременного циклического нагружения. К циклическим методам снижения остаточных напряжений можно отнести вибрационную, ультразвуковую и электрогидроимпульсную обработки.

Методы вибрационной обработки с целью снижения остаточных напряжений подробно опи-

саны в трудах [2–6]. Низкочастотную вибрационную обработку используют для снижения уровня остаточных напряжений в сварных конструкциях [7]. Для правки оружейных стволов разработана вибрационная правка под напряжением путем растяжения и закручивания с последующими радиальными колебаниями от вибратора с суммарным напряжением ниже предела пропорциональности и количеством циклов нагружения от 900 до 1500 [8].

Ультразвуковая обработка описана в трудах [9–11], и ее используют вместо термической при изготовлении колец подшипников. Режимы обработки для каждой конкретной детали устанавливаются экспериментально.

Сущность электрогидроимпульсного метода заключается в обработке напряженных участков изделия многократными импульсами давления, генерируемыми высоковольтными разрядами в воде. Уровень снятия внутренних напряжений при этом примерно соответствует уровню, достигаемому при термической обработке [12].

В результате проведенного анализа можно прогнозировать, что для повышения точности и стабилизации геометрических форм ответственных маложестких деталей целесообразно использовать циклическое знакопеременное нагружение.

Для решения поставленной задачи обоснования параметров стабилизационной обработки кольцевых заготовок малой жесткости на основе циклического нагружения наиболее близок способ динамической стабилизации, успешно используемый при производстве деталей малой жесткости типа дисков [13].

Целью настоящей работы является разработка расчета силовых параметров стабилизации кольцевых заготовок малой жесткости с использованием основных положений динамической стабилизации.

Способ динамической стабилизации основан на экспериментально подтвержденном выводе о том, что при нагружении детали знакопеременной циклической нагрузкой происходит стабилизация геометрической формы детали относительно оси или плоскости приложения знакопеременной нагрузки при одновременном снятии остаточных напряжений. Принципиальное отличие способа динамической стабилизации от других методов состоит в том, что конечная точность достигается независимо от величины исходной погрешности и не требуются предварительные измерения погрешности деталей. Это отличие является существенным преимуществом для автоматизированного производства.

Основные условия назначения режимов динамической стабилизации заключаются в следующем:

- максимальное суммарное напряжение $\sigma_{\text{рас}}$, создаваемое в процессе нагружения, должно быть

в диапазоне $(1,0 \dots 0,85)\sigma_T$ предела текучести для применяемого материала;

- суммарное число циклов нагружения рекомендуется в пределах 100...800 и окончательно уточняется по уровню накопления усталостных повреждений.

Расчетная схема стабилизации кольцевой заготовки базируется на схеме нагружения плоского кольца радиальными растягивающими силами одинаковой величины, лежащими в одной плоскости с равномерным шагом по окружности, представленная на рисунке 1.

Задачей расчета является определение величин напряжений и перемещений в кольце при 6-, 3- и 2-позиционных схемах нагружения при заданном радиальном усилии P . Для принятых схем нагружения изгибающий момент M_φ и нормальное усилие N_φ в текущем сечении кольца определяются по зависимостям [14]:

$$M_\varphi = P \cdot r \cdot \left(\frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2} - \varphi\right)}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{1}{\alpha} \right); \quad (1)$$

$$N_\varphi = \frac{P}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \varphi\right), \quad (2)$$

где P — радиальная сила; r — средний радиус кольца; $\alpha = \frac{2\pi}{n}$, рад — угол между радиальными силами (n — число радиальных сил); φ — угол текущего сечения.

В таблице 1 приведены результаты расчета изгибающего момента и нормального усилия для выбранных 6-, 3- и 2-позиционных схем нагружения

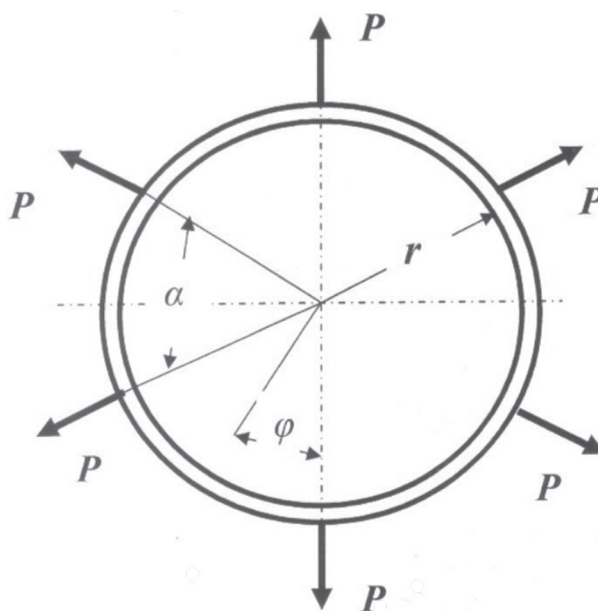


Рисунок 1 — Расчетная схема нагружения кольца
Figure 1 — Calculation scheme of ring loading

Таблица 1 — Значения изгибающего момента и нормального усилия для 6-, 3- и 2-позиционных схем нагружения
Table 1 — Bending moment and normal force values for 6-, 3- and 2-position loading schemes

Параметр	Значение		
Число радиальных сил n	2	3	6
Угол между радиальными силами α , рад	3,142	2,094	1,047
Угол между радиальными силами α , град	1800	1200	600
Изгибающий момент $M_{\varphi=0}$	$-0,3183Pr$	$-0,1888Pr$	$-0,0889Pr$
Изгибающий момент $M_{\varphi=\alpha/2}$	$0,1817Pr$	$0,0999Pr$	$0,0451Pr$
Изгибающий момент $M_{\varphi=\alpha}$	$-0,3183Pr$	$-0,1888Pr$	$-0,0889Pr$
Нормальное усилие при $N_{\varphi=0}$	0	$0,289P$	$0,866P$
Нормальное усилие при $N_{\varphi=\alpha/2}$	$0,5P$	$0,577P$	$1P$
Нормальное усилие при $N_{\varphi=\alpha}$	0	$0,289P$	$0,866P$

в точке приложения усилия нагружения P и на середине участка кольца между усилиями P .

По полученным значениям изгибающего момента для 6-, 3- и 2-позиционных схем нагружения построены эпюры изгибающего момента, приведенные на рисунке 2.

Напряжение изгиба от изгибающего момента равно:

$$\sigma_{и} = \frac{M_{и}}{W}, \quad (3)$$

где $W = \frac{h \cdot s^2}{6}$ — момент сопротивления сечения

кольца (s — ширина сечения кольца; h — высота кольца).

Напряжение растяжения от действия нормального усилия N равно:

$$\sigma_{р} = \frac{N}{F}, \quad (4)$$

где $F = h \cdot s$ — площадь сечения кольца.

Совместное действие изгибающего момента $M_{и}$ и нормального усилия N учитывается их суммированием для принятых 6-, 3- и 2-позиционных схем нагружения [8]:

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{M_{и}}{W} + \frac{N}{F}. \quad (5)$$

Значение максимального напряжения σ_{max} определяется из сравнения суммарных напряжений при $\varphi = 0$ и $\varphi = \alpha/2$.

Для реализации процесса стабилизации необходимо создать в кольце напряжение, ориентировочно равное условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$:

$$\sigma_{\Sigma} \geq \sigma_{0,2}. \quad (6)$$

Ориентировочные значения предела текучести $\sigma_{0,2}$ при различных температурах можно определять из графиков, представленных на рисунке 3 [15, 16].

В зависимости от марки стали кольца и принятой температуры окончания стабилизации устанавливается значение предела текучести $\sigma_{0,2}$, по которому выполняется расчет требуемого радиального

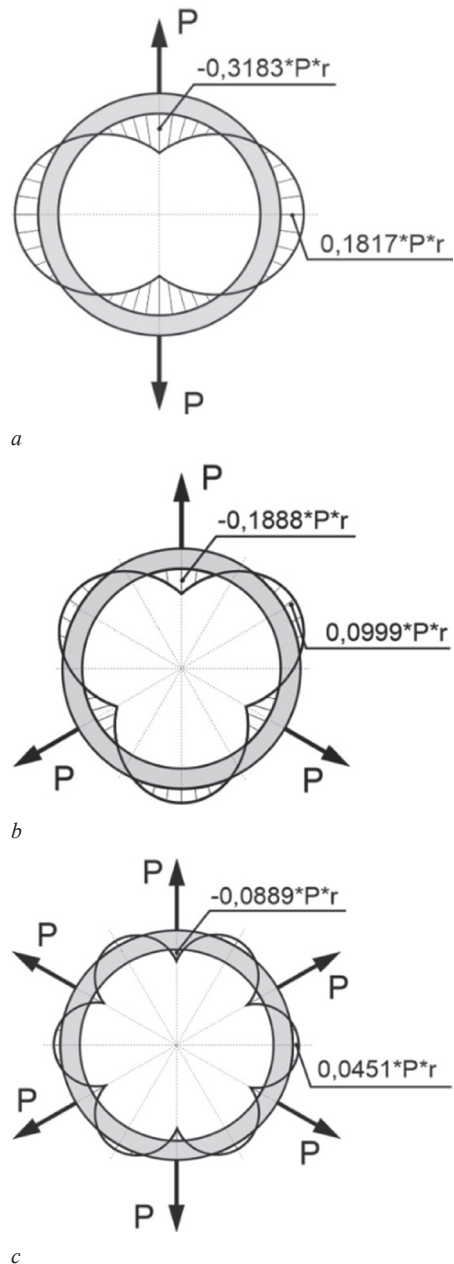


Рисунок 2 — Эпюры изгибающего момента для схем нагружения: а — 2-позиционной; б — 3-позиционной; в — 6-позиционной
Figure 2 — Bending moment diagrams for loading schemes: а — 2-position; б — 3-position; в — 6-position

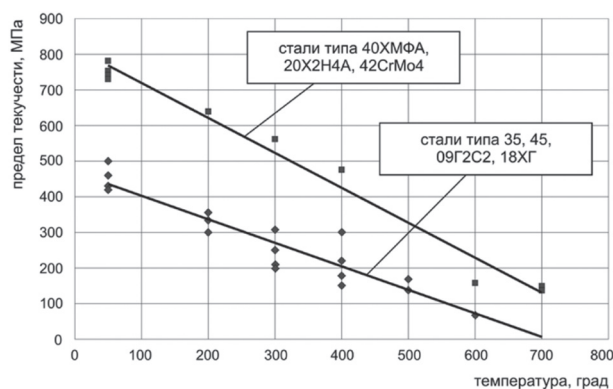


Рисунок 3 — Значения предела текучести $\sigma_{0,2}$ при различных температурах
 Figure 3 — Yield strength values $\sigma_{0,2}$ at different temperatures

усилия нагружения P при 6-, 3- и 2-позиционных схемах нагружения по обратной зависимости (1).

Для принятой схемы нагружения и радиального усилия P необходимо определить величину перемещений точки кольца в месте приложения силы P .

Для определения величины перемещения точки кольца в месте приложения силы P относительно

Таблица 2 — Исходные параметры кольца
 Table 2 — Initial ring parameters

Параметры кольца	Значение
Наружный диаметр D , мм	392,0
Внутренний диаметр d , мм	340,0
Высота h , мм	36,0
Средний радиус r , мм	183,0
Ширина сечения s , мм	26,0
Площадь сечения F , мм ²	936,0
Момент сопротивления сечения W , мм ³	4056,0
Момент инерции сечения J , мм ⁴	52 728,0

Таблица 3 — Результаты расчета суммарного напряжения при заданном радиальном усилии
 Table 3 — Calculation results of the total stress at a given radial force

Параметры	Значение		
Число позиций	2	3	6
Принятое радиальное усилие P , кН	500	500	500
Текущий угол $\varphi = 0$, град:	0	0	0
напряжение изгиба $\sigma_{и}$, Н/мм ²	7189	4259	2006
напряжение растяжения $\sigma_{р}$, Н/мм ²	0,0	154,2	462,6
суммарное напряжение σ_{Σ} , Н/мм ²	7180,8	4413,2	2468,2
Текущий угол $\varphi = \alpha/2$, град:	90	60	30
напряжение изгиба $\sigma_{и}$, Н/мм ²	4098,8	2253,3	1016,7
напряжение растяжения $\sigma_{р}$, Н/мм ²	267,1	308,4	534,2
суммарное напряжение σ_{Σ} , Н/мм ²	4365,9	2561,7	1550,9

Таблица 4 — Предел текучести стали 40KhMFA при различных температурах
 Table 4 — Yield strength of 40KhMFA steel at different temperatures

Температура T , °C	700	600	500	400	300	200	50
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	150	240	340	440	520	610	760

но центра кольца можно воспользоваться зависимостью [14]:

$$\delta_1 = \frac{P \cdot r^3}{E \cdot J} \cdot \frac{1}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \cdot \left(\frac{\alpha}{4} + \frac{1}{4} \sin \alpha - \frac{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{\alpha} \right) + \frac{P \cdot r}{E \cdot F} \cdot \frac{1}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \cdot \left(\frac{\alpha}{4} + \frac{1}{4} \sin \alpha \right), \quad (7)$$

где J — момент инерции сечения кольца.

Пример расчета силовых параметров стабилизации для кольца из стали 40ХМФА с размерами 392 × 340 × 36 мм. Исходные параметры кольца приведены в таблице 2.

Расчет выполняется для определения возможностей проведения стабилизации кольца при 6-, 3- и 2-позиционных схемах нагружения при принятом радиальном усилии P , равном 500 кН. В таблице 3 приведены результаты расчета по определению максимального напряжения в кольце при 6-, 3- и 2-позиционных схемах нагружения в точках приложения усилия P ($\varphi = 0$) и между усилиями P ($\varphi = \alpha/2$).

Из таблицы 3 можно сделать вывод о том, что максимальное напряжение при всех схемах нагружения создается в сечении кольца в месте приложения радиального усилия на внутреннем диаметре при $\varphi = 0$. Для сравнения достигаемого суммарного напряжения при нагружении кольца радиальным усилием 500 кН в таблице 4 приведены значения предела текучести стали 40ХМФА при различных температурах.

Сравнивая величины создаваемого суммарного напряжения в кольце при 6-, 3- и 2-позиционных схемах нагружения при принятом радиальном усилии 500 кН в пределах от 2488 до 7181 МПа

Таблица 5 — Результаты расчета и моделирования напряжений для 6-, 3- и 2-плунжерных схем нагружения при радиальном усилии $P = 500$ кН кольца $392 \times 340 \times 36$ мм
 Table 5 — Results of calculation and modeling of stresses for 6-, 3- and 2-plunger loading schemes at radial force $P = 500$ kN of the $392 \times 340 \times 36$ mm ring

Параметры колец	Схема нагружения		
Число радиальных усилий	2	3	6
Моделированная схема нагружения с использованием программного обеспечения ANSYS			
Эквивалентное напряжение по Мизесу, Н/мм ²	7340,3	4270,8	2160,1
Моделированная схема нагружения с использованием программного обеспечения Компас-3D			
Моделированное суммарное напряжение на внутреннем диаметре под усилием P , Н/мм ²	7072,0	4026,7	1271,8
Расчетные напряжения по зависимостям (1)–(5)			
Расчетное суммарное напряжение на внутреннем диаметре под усилием P , Н/мм ²	7180,8	4413,2	2468,2

и значения предела текучести для стали 40ХМФА (при различных температурах) в пределах от 150 до 760 МПа, можно сделать вывод о том, что использование устройства с радиальным усилием $P = 500$ кН обеспечит проведение стабилизации расчетного кольца при любой из 6-, 3- и 2-позиционных схем нагружения при холодном и горячем состоянии кольца.

Для проверки результатов расчетного определения напряжений по зависимостям (1)–(5) для кольца с размерами $392 \times 340 \times 36$ мм было проведено моделирование нагружения с использованием программного обеспечения ANSYS и Компас-3D (таблица 5).

Сравнение расчетных и моделированных напряжений при радиальном усилии $P = 500$ кН кольца с размерами $392 \times 340 \times 36$ мм показало совпадающую закономерность. Для предварительных расчетов силовых параметров кольцевых заготовок малой жесткости рекомендуется использовать вышеприведенные расчетные зависимости (1)–(5).

Заключение. 1. Для стабилизации кольцевых заготовок в холодном и горячем состоянии при 6-, 3- и 2-позиционных схемах нагружения радиальными усилиями предложены расчетные зависимости для определения силовых параметров стабилизации при создании в кольце напряжений на уровне условного предела текучести.

2. С использованием предложенных расчетных зависимостей возможно определение силовых параметров создаваемых устройств для выполнения стабилизации, также оценка возможностей использования имеющихся устройств.

Список литературы

1. Automotive, transportation, e-mobility [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.galdabini.eu/straightening/automotive-transportation-e-mobility/>. — Date of access: 14.12.2023.

2. Рагульскис, К.М. Вибрационное старение / К.М. Рагульскис, Б.Б. Ступильнас, К.Б. Толутис; под ред. К.М. Рагульскиса. — Л.: Машиностроение, 1987. — 72 с.
3. Dawson, R. Vibratory stress relief: a fundamental study of its effectiveness / R. Dawson, D.G. Moffat // Journal of Engineering Materials and Technology. — 1980. — Vol. 102, iss. 2. — Pp. 169–176. — DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3224793>.
4. Даукшас, К.К. Стабилизация формы деталей вибрационным нагружением: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / К.К. Даукшас. — Иркутск, 1996. — 178 л.
5. Лашенко, Г.И. Виброобработка сварных машиностроительных конструкций / Г.И. Лашенко // Сварочное производство. — 1992. — № 12. — С. 3–4.
6. Лашенко, Г.И. Основы вибрационной обработки сварных конструкций / Г.И. Лашенко, Ю.А. Никитюк. — Киев: НПФ «ВИСП», 2013. — 38 с.
7. Летуновский, А.П. Снятие технологических остаточных напряжений в металлоконструкциях низкочастотной виброобработкой / А.П. Летуновский, А.А. Антонов, О.И. Степлов // Заготовительное производство в машиностроении. — 2012. — № 8. — С. 12–16.
8. Крекнин, Л.Т. Производство автоматического оружия. Часть 1 — производство стволов: учеб. пособие / Л.Т. Крекнин. — Ижевск, 1998. — 238 с.
9. Бабенко, М.Г. Совершенствование технологии обеспечения размерной точности прецизионных деталей типа колец подшипников на основе ультразвуковой стабилизации внутренних напряжений: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / М.Г. Бабенко. — Саратов, 2002. — 150 л.
10. Слесарев, С.В. Совершенствование технологии стабилизации остаточных напряжений в прецизионных деталях типа колец подшипников на основе применения ультразвуковой энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / С.В. Слесарев. — Саратов, 2006. — 180 л.
11. О применимости энергии ультразвука в оптимизации технологических процессов релаксации остаточных напряжений / Т.А. Балтаев [и др.] // Ѓылым жэне бiлiм = Наука и образование. — 2015. — № 3(40). — С. 55–59.
12. Горохов, В.А. Материалы и их технологии: учебник: в 2 ч. Часть 1 / В.А. Горохов, Н.В. Беляков, А.Г. Схиртладзе; под ред. В.А. Горохова. — М.: ИНФРАМ, 2014. — 589 с.
13. Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация в производстве маложестких деталей / В.Е. Антонюк. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 190 с.
14. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин: справ. / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Р.М. Шнейдерович. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1993. — 640 с.
15. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин [и др.], под ред. В.Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
16. Центральный металлический портал [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://metallcheckiy-portal.ru/>. — Дата доступа: 14.08.2023.

ANTONYUK Vladimir E., D. Sc. in Eng., Prof.

Chief Researcher of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”

E-mail: vladi@tut.by

Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 01 November 2023.

JUSTIFICATION OF FORCE PARAMETERS FOR STABILIZATION OF RING BLANKS OF LOW RIGIDITY

The necessity of stabilization of ring blanks of low rigidity is substantiated. For stabilization a 6-position loading scheme with uniformly distributed radial forces is proposed, with the possibility to transform into 3- and 2-position loading schemes. The stress state of the ring under loading by uniformly distributed radial forces is analyzed, and calculation dependences for determining the total stress at 6-, 3- and 2-position loading schemes are proposed. Calculation dependences are offered for determination of force parameters of the device with lever-joint mechanism for creation of stresses in the ring at the level of conditional yield strength. According to the proposed method of calculation of force parameters, an example of calculation is given for a ring made of 40ХМФА (40KhMFA) steel with an outside diameter of 392 mm. The developed recommendations can be used at creation of devices for stabilization and removal of residual stresses in ring blanks, which are necessary for manufacture of critical products in such areas as auto- and aircraft construction, precision engineering, military industry.

Keywords: ring blank, ring, stress state, stabilization, radial force, lever-joint mechanism

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-30-35>

References

1. *Automotive, transportation, e-mobility*. Available at: <https://www.galdabini.eu/straightening/automotive-transportation-e-mobility> (accessed 14 December 2023).
2. Ragulskis K.M., Stupilnas B.B., Tolutis K.B. *Vibratsionnoe starenie* [Vibration ageing]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 72 p. (in Russ.).
3. Dawson R., Moffat D.G. Vibratory stress relief: a fundamental study of its effectiveness. *Journal of engineering materials and technology*, 1980, vol. 102, iss. 2, pp. 169–176. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3224793>.
4. Daukshas K.K. *Stabilizatsiya formy detaley vibratsionnym nagruzeniem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Shape stabilization of parts by vibration loading. Ph. D. thesis]. Irkutsk, 1996. 178 p. (in Russ.).
5. Lashchenko G.I. Vibroobrabotka svarnykh mashinostroitelnykh konstruksiy [Vibration treatment of welded engineering structures]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1992, no. 12, pp. 3–4 (in Russ.).
6. Lashchenko G.I., Nikityuk Yu.A. *Osnovy vibratsionnoy obrabotki svarnykh konstruksiy* [Fundamentals of vibration processing of welded structures]. Kiev, OOO “NPF “VISP” Publ., 2013. 38 p. (in Russ.).
7. Letunovskiy A.P., Antonov A.A., Steklov O.I. Snyatie tekhnologicheskikh ostatochnykh napryazheniy v metallokonstruktsiyakh nizkochastotnoy vibroobrabotkoy [Removal of technological residual stresses in metal structures by low-frequency vibration processing]. *Blanking productions in mechanical engineering*, 2012, no. 8, pp. 12–16 (in Russ.).
8. Kreknin L.T. *Proizvodstvo avtomaticheskogo oruzhiya. Chast 1 — proizvodstvo stvolov* [Manufacture of automatic weapons. Part 1 — production of barrels]. Izhevsk, 1998. 238 p. (in Russ.).
9. Babenko M.G. *Sovershenstvovanie tekhnologii obespecheniya razmernoy tochnosti pretsizionnykh detaley tipa kolets podshipnikov na osnove ultrazvukovoy stabilizatsii vnutrennikh napryazheniy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of technology for dimensional accuracy of precision parts of bearing rings type on the basis of ultrasonic stabilization of internal stresses. Ph. D. thesis]. Saratov, 2002. 150 p. (in Russ.).
10. Slesarev S.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii stabilizatsii ostatochnykh napryazheniy v pretsizionnykh detalyakh tipa kolets podshipnikov na osnove primeneniya ultrazvukovoy energii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Perfection of technology of stabilization of residual stresses in precision parts of bearing rings type on the basis of application of ultrasonic energy. Ph. D. thesis]. Saratov, 2006. 180 p. (in Russ.).
11. Baltaev T.A., Samigullaeva N.T., Korolev A.V., Balaev A.F. *O primenimosti energii ultrazvuka v optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov relaksatsii ostatochnykh napryazheniy* [On applicability of ultrasound energy in optimization of technological processes of residual stress relaxation]. *Фильм және білім = Nauka i obrazovanie*, 2015, no. 3(40), pp. 55–59 (in Russ.).
12. Gorokhov V.A., Belyakov N.V., Skhirtladze A.G. *Materialy i ikh tekhnologii. Chast 1* [Materials and their technologies. Part 1]. Moscow, INFRAM Publ., 2014. 589 p. (in Russ.).
13. Antonyuk V.E. *Dinamicheskaya stabilizatsiya v proizvodstve malozhestkikh detaley* [Dynamic stabilization in the production of low rigidity parts]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2017. 190 p. (in Russ.).
14. Birger I.A., Shorr B.F., Shneyderovich R.M. *Raschet na prochnost detaley mashin* [Strength calculation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 640 p. (in Russ.).
15. Sorokin V.G., et al. *Marochnik staley i splavov* [Steel and alloy grade guide]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 640 p. (in Russ.).
16. *Tsentralnyy metallicheskiy portal* [Central metal portal]. Available at: <https://metallicheckiy-portal.ru/> (accessed 14 August 2023) (in Russ.).