УДК 539.3

# МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

*Канд. техн. наук* ***АНТОНЮК В. Е.***

*Институт механики и надежности машин НАН Беларуси*

За рубежом в массовом производстве используются установки для правки с многократным приложением знакопеременных нагрузок. Эти установки применяются для правки деталей типа тонкостенных колец, длинных сплошных и пустотелых валов [1]. Во всех случаях отмечается высокая эффективность данного метода правки, в процессе которой достигаются высокая точность независимо от исходной погрешности, уменьшение внутренних напряжений, стабильность геометрической формы деталей при последующей обработке, сокращение операций термической обработки, увеличение срока службы деталей. Таким образом, нагружение деталей в этих установках имеет циклический знакопеременный характер, а целью нагружения является придание деталям стабильных свойств. Для названия такого процесса используем термин «динамическая стабилизация».

В отечественных производствах динамическая стабилизация эффективно используется при изготовлении дисков сцепления и фрикционных дисков [2].

**Основные положения динамической стабилизации.** Динамическая стабилизация основана на том, что при нагружении детали знакопеременной циклической нагрузкой с амплитудными значениями в диапазоне от предела пропорциональности $\sigma_{пп}$ до предела текучести $\sigma_т$ происходит стабилизация геометрической формы детали относительно оси или плоскости приложения знакопеременной нагрузки.

В результате нагружения детали знакопеременной силой $P$ или моментом $M$ исходная погрешность детали $h_{исх}$ становится равной $h_{кон}$, которая может достигать всего 5...8 % от величины исходной погрешности $h_{исх}$. Одновременно за счет циклического нагружения происходят стабилизация фазового и структурного состояний материала деталей и релаксация остаточных напряжений, что и объясняет физическую сущность стабилизации геометрических параметров деталей [3].

Для определения основных параметров режима нагружения при динамической стабилизации были проведены исследования влияния уровня, характера и продолжительности нагружения на изменение геометрических параметров деталей. Программа исследований включала изготовление специальных образцов из разных марок сталей, изучение поведения геометрических параметров образцов при различных уровнях и циклограммах нагружения, выявление закономерностей изменения геометрических параметров образцов в зависимости от режима нагружения.

Первоначальная погрешность (изгиб) образца задавалась путем нагружения его постоянным изгибающим моментом до появления начального прогиба оси образца $\varepsilon_{нач}$. Для оценки уровня нагружения было принято отношение нормального напряжения изгиба $\sigma_и$ к пределу текучести данного материала $\sigma_т$.

Под стабилизацией оси образца понималось уменьшение прогиба оси образца в процессе циклического нагружения, а уровень стабилизации геометрической оси образца (исправляемость) оценивался как отношение конечной величины прогиба оси $\varepsilon_и$ к первоначальной $\varepsilon_{нач}$.

Исследовалось влияние на стабилизацию геометрической оси образцов уровня нагружения $\sigma_и/\sigma_т$, длительности нагружения, величины первоначальной погрешности, характеристик материала образцов, различных вариантов

циклограмм нагружения. Результаты измерений погрешностей геометрической оси образцов обрабатывались при допущении нормального распределения основного отклонения с вычислением основных характеристик.

В результате проведенных исследований установлено, что наибольшая стабилизация оси образцов (исправляемость) достигается на уровне нагружения $\sigma_и/\sigma_т = 1$, ниже уровня $\sigma_и/\sigma_т = 0{,}85$ происходит резкое уменьшение эффекта исправляемости (рис. 1).

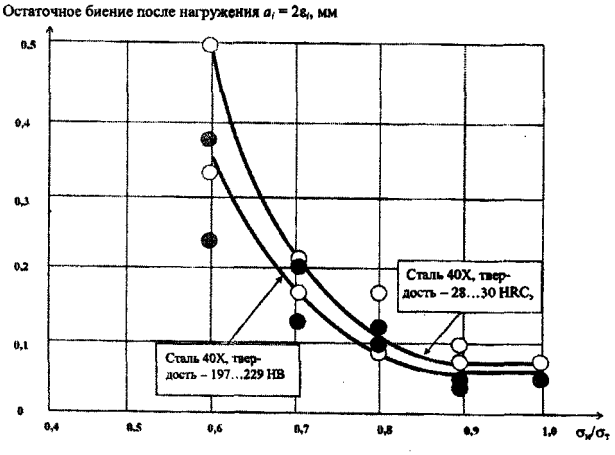


*Рис. 1.* Уровень стабилизации в зависимости от уровня нагружения

Зависимость стабилизации (исправляемости) от уровня нагружения и числа циклов нагружения представлена на рис. 2. При более высоком уровне нагружения требуется меньшее число циклов нагружения для достижения эффективного действия динамической стабилизации, при уровне нагружения $\sigma_и/\sigma_т = 1$ эффективная исправляемость отмечается после первых 100 циклов нагружения, при уровне нагружения $\sigma_и/\sigma_т = 0{,}8$ требуется уже не менее 500 циклов.

Установлено, что при уровне нагружения $\sigma_и/\sigma_т = 1{,}0$ достигается минимальное значение окончательной погрешности практически для любой исследованной величины исходной погрешности.

С учетом полученных результатов по выявлению эффективного диапазона действия динамической стабилизации на сталях 45 и 40Х, были проведены такие же исследования на образцах из стали 65Г с твердостью 207...241 НВ и 30...32 HRC$_э$, стали 30ХГСА с твердостью 26...28 HRC$_э$ и 42...44 HRC$_э$. В результате была определена область эффективной стабилизации в зависимости от уровня нагружения и числа циклов нагружения (рис. 3).

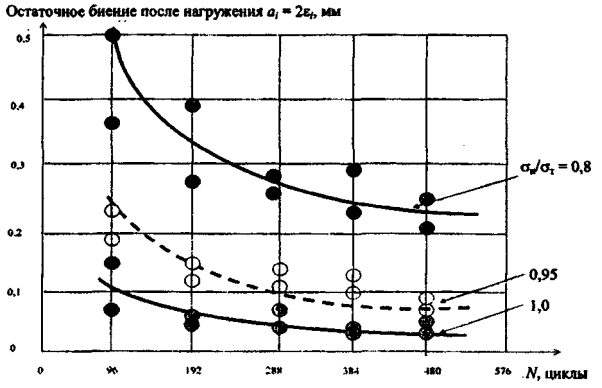


*Рис. 2.* Уровень стабилизации в зависимости от числа циклов и уровня нагружения

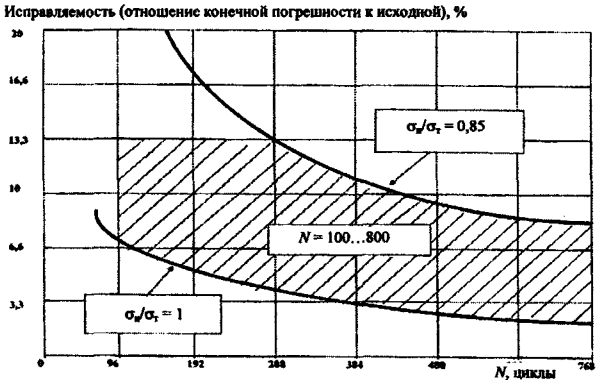


*Рис. 3.* Область эффективного действия динамической стабилизации

Установленный диапазон эффективного действия динамической стабилизации заключается в том, что по уровню нагружения напряжения должны достигать максимальных значений $\sigma_и = (1{,}0...0{,}85)\sigma_т$ и уменьшаться по определенному закону (циклограмме). При уровне нагружения $\sigma_и/\sigma_т = 1$ минимальное число циклов нагружения должно быть не менее 100, при уменьшении уровня наружения требуемое число циклов увеличивается и при минимальном рекомендуемом уровне нагружения $\sigma_и/\sigma_т = 0{,}85$ число циклов нагружения должно быть в пределах 500...800.

Исследования по выбору рационального типа циклограмм проводились с циклограммами трех типов и максимальными уровнями нагружения, равными $1\sigma_т$, $0{,}9\sigma_т$ и $0{,}8\sigma_т$. Для каждого максимального уровня нагружения исследовались два вида циклограмм – одно- и

многоступенчатая со ступенчато убывающими уровнями нагружения. На каждом уровне задавалась своя циклограмма нагружения, на уровне $1\sigma_т$ она была треугольной, на остальных – трапецеидальной. После выработки циклограммы продолжалось испытание образца при его нагружении на уровне напряжения, соответствующем пределу усталости, с доведением до разрушения. Эти данные использовались в расчетах доли накопления повреждений.

В результате проведенных испытаний установлено, что наилучшие результаты исходя из соотношения минимальной доли расходования ресурса работоспособности и максимального уровня стабилизации (исправляемости) достигнуты при максимальном уровне нагружения:

- $\sigma_и = (1{,}0...0{,}95)\sigma_т$ при циклограмме треугольной формы;
- $\sigma_и = (0{,}95...0{,}85)\sigma_т$ при циклограмме трапецеидальной формы;
- $\sigma_и = (0{,}95...0{,}85)\sigma_т$ при наличии второй ступени нагружения с уровнем нагружения примерно на 0,1 $\sigma_т$ меньше, чем на первой ступени.

**Ограничения по уровню накопления усталостных повреждений.** Нагружение детали циклической знакопеременной нагрузкой приводит к накоплению относительно небольших усталостных повреждений, величины которых в относительных долях ресурсов работоспособности можно приближенно определить, используя гипотезу линейного суммирования повреждений

$$a_{пр} = \frac{\Sigma\sigma_i^m n_i}{\sigma_{-1}^m N_0},$$

где $\sigma_i$ – значение напряжения динамической стабилизации при числе циклов действия напряжений $n_i$; $\sigma_{-1}$ – предел выносливости; $N_0$ – базовое число циклов нагружения; $m$ – показатель уравнения кривой усталости; $a_{пр}$ – уровень накопления усталостных повреждений или доля потери ресурса работоспособности.

На рис. 4 представлена типовая циклограмма динамической стабилизации, при использовании которой при различных вариантах нагружения в табл. 1 приведены расчетные доли потери ресурса работоспособности (или уровни накопления усталостных повреждений).

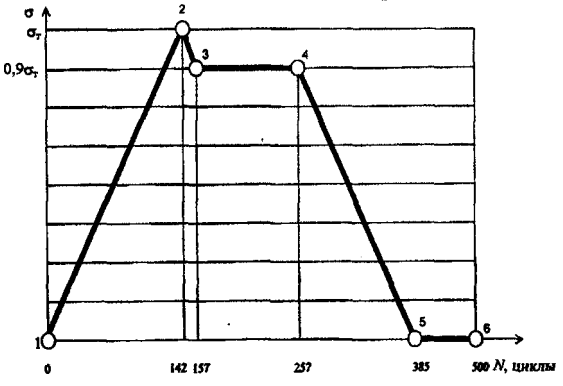


*Рис. 4.* Типовая циклограмма динамической стабилизации

*Таблица 1*

**Уровни накопления повреждений при различных вариантах нагружения**

| Материал, твердость | Вариант циклограммы | | Участки циклограммы | | | | $\Sigma\sigma_i^m n_i$ | $a_{пр}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1–2 | 2–3 | 3–4 | 4–5 | | |
| | | | $0–1\sigma_т$ | $1\sigma_т–0{,}9\sigma_т$ | $0{,}9\sigma_т$ | $0{,}9\sigma_т–0$ | | |
| Сталь 40Х 197...229 НВ | 1 | $n_i$ | 142 | 15 | 100 | 128 | $236\cdot10^{23}$ | 0,143 |
| | | $\sigma_i^m n_i$ | $67\cdot10^{23}$ | $32\cdot10^{23}$ | $128\cdot10^{23}$ | $9\cdot10^{23}$ | | |
| | 2 | $n_i$ | 142 | 15 | 50 | 128 | $172\cdot10^{23}$ | 0,104 |
| | | $\sigma_i^m n_i$ | $67\cdot10^{23}$ | $32\cdot10^{23}$ | $64\cdot10^{23}$ | $9\cdot10^{23}$ | | |
| Сталь 40Х 30 $HRC_э$ | 1 | $n_i$ | 150 | 15 | 100 | 128 | $291\cdot10^{24}$ | 0,232 |
| | | $\sigma_i^m n_i$ | $102\cdot10^{24}$ | $48\cdot10^{24}$ | $127\cdot10^{24}$ | $14\cdot10^{24}$ | | |
| | 2 | $n_i$ | 150 | 15 | 50 | 128 | $228\cdot10^{24}$ | 0,182 |
| | | $\sigma_i^m n_i$ | $102\cdot10^{24}$ | $48\cdot10^{24}$ | $64\cdot10^{24}$ | $14\cdot10^{24}$ | | |
| | 3 | $n_i$ | 150 | 15 | 20 | 128 | $189\cdot10^{24}$ | 0,151 |

Варьируя числом циклов нагружения на постоянных уровнях нагружения, можно получать различные значения $a_{пр}$ и выбирать рациональное соотношение уровня накопления повреждений на различных участках циклограммы для получения минимального значения доли потери ресурса работоспособности.

## ВЫВОДЫ

1. В итоге сформулированы основные методические положения для назначения режимов динамической стабилизации деталей из конструкционных сталей:

- должны создаваться напряжения, увеличивающиеся до максимальных расчетных $\sigma_{рас}$ в диапазоне $(1{,}0\ldots0{,}85)\sigma_т$ – предела текучести для применяемого материала;
- при максимальном уровне нагружения $\sigma_{рас}/\sigma_т = 1$ рекомендуется применение треугольной формы циклограмм, при максимальном уровне нагружения $\sigma_{рас}/\sigma_т = 0{,}95\ldots0{,}85$ – трапецеидальной формы циклограммы;
- суммарное число циклов нагружения рекомендуется в пределах 100...800, однако должно окончательно уточняться по уровню накопления усталостных повреждений.

2. Требования современных конструкций машин по снижению металлоемкости и повышению долговечности напрямую связаны с необходимостью изготовления деталей со стабильной геометрической формой. Динамическая стабилизация является эффективным средством повышения точности и долговечности различных деталей. Основные принципы динамической стабилизации могут быть успешно применены к различным видам деталей, имеющих нежесткую конструкцию, подвергаемых в процессе изготовления различным видам деформаций, использующих разные виды статической правки как для повышения точности изготовления, так и для снятия остаточных напряжений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ракошиц Г. С., Кузьминцов В. Н.** Машинная правка проката, поковок и деталей. – М.: Высш. шк., 1983. – 199 с.

2. **Антонюк В. Е.** Динамическая стабилизация геометрических параметров деталей знакопеременным нагружением. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – 184 с.

3. **Хенкин М. Л., Локшин И. Х.** Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. – М., 1974. – 256 с.

УДК 621.923

# АНАЛИЗ СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ БОЧКООБРАЗНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РОЛИКОВ ПРИ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ

***Канд. техн. наук КРИВКО Г. П., асп. ЧЕРЕЙ Д. А.***

*Белорусский национальный технический университет*

В роликовых радиальных сферических двухрядных подшипниках используются тела качения (ролики) с бочкообразной поверхностью. Формирование качества бочкообразной поверхности ролика на финишных операциях имеет специфический характер. Вследствие переменной кривизны бочкообразного ролика вдоль его оси он подвергается абразивному воздействию сечениями бруска, кривизна которых не соответствует кривизне ролика. Для описания этих явлений примем ширину бруска $h_б = 16$ мм, а величину амплитуды осцилляции – $A = 3$ мм.

Предположим, что при крайнем правом положении бруска он приработался полностью по всей поверхности ролика. После перемещения бруска влево на величину амплитуды осцилляции $A = 3$ мм (при неизнашивающемся бруске) произойдет контактирование следующих сечений ролика и бруска (рис. 1).

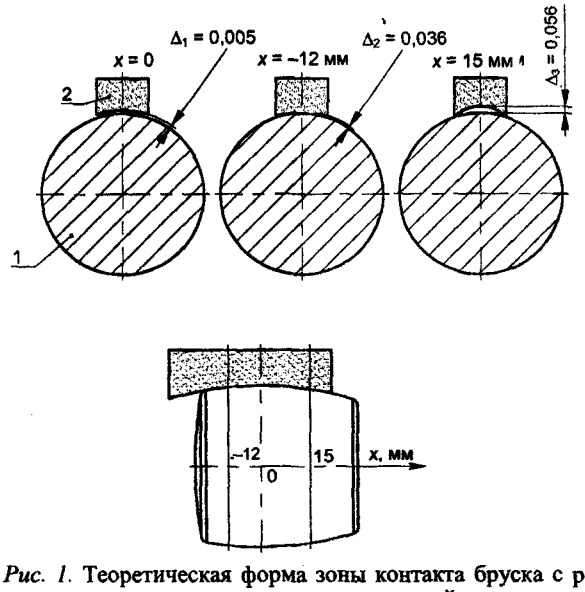


*Рис. 1.* Теоретическая форма зоны контакта бруска с роликом в различных сечениях при его крайнем левом положении: 1 – ролик; 2 – брусок; Δ – зазор, мм