

УДК 621.81:658.562

В. А. Полетаев, И. В. Чичерин

ГИДРОВИБРАЦИОННЫЙ МЕТОД РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СТАНИН ВЗРЫВОЗАЩЕННЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Станина взрывозащищенного асинхронного двигателя (ВАД) является базовой сборочной единицей, определяющей точность взаимного расположения деталей и сборочных единиц в двигателе и, в конечном счете, точность его важнейшего функционального параметра – радиальный воздушный зазор между поверхностями статора и ротора. Это обстоятельство предъявляет высокие требования к точности станин ВАД.

Станина ВАД представляет собой сварную обечайку из малоуглеродистой стали толщиной 8–12 мм, к которой приварены патрубки коробки выводов, ребра охлаждения, лапы, фланцы и бобышки.

При изготовлении станин доминирующими являются сварочные операции, вызывающие значительные температурные деформации обечайки, большую погрешность формы ее отверстия и приводящие к возникновению напряжений. Две операции пластического деформирования (дорнования) также приводят к появлению в материале обечайки станины значительных остаточных напряжений.

Исследования напряженно-деформированного состояния станин ВАД [1] показали, что после изготовления в станине имеются большие растягивающие остаточные напряжения, релаксация которых и явление ползучести приводят к значительному изменению первоначальных размеров. Анализ применяемых в настоящее время методов снижения остаточных напряжений [1, 2, 3,] позволил выбрать за основу метод вибрационной обра-

ботки как наиболее экономичный и эффективный.

Условием снижения остаточных напряжений при виброобработке являются [3]:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{max} + \sigma_{ost} \geq \sigma_{nu}, \quad (1)$$

где σ_{Σ} – суммарное напряжение цикла нагружения; σ_{max} – максимальное напряжение цикла переменной внешней нагрузки; σ_{ost} – величина остаточных напряжений; σ_{nu} – предел пропорциональности при циклическом нагружении.

Поскольку величина σ_{ost} в станинах АД близки к пределу пропорциональности [1], то, как следует из (1), для снижения остаточных напряжений требуется сравнительно небольшая величина максимальной внешней переменной нагрузки σ_{max} , а, следовательно, и сравнительно незначительные энергозатраты.

При разработке метода снижения остаточных напряжений основными задачами являлись:

1) выполнение операции с минимальной себестоимостью;

2) выбор режимов виброобработки, обеспечивающих наименьшее изменение размеров деталей во времени, а также повышение коррозионной стойкости и усталостной прочности корпусных деталей с целью повышения надежности взрывозащиты АД.

Первая задача решена совмещением операции по снижению остаточных напряжений с последней операцией при изготовлении корпусных деталей – операцией гидроиспытания на взрывоустой-

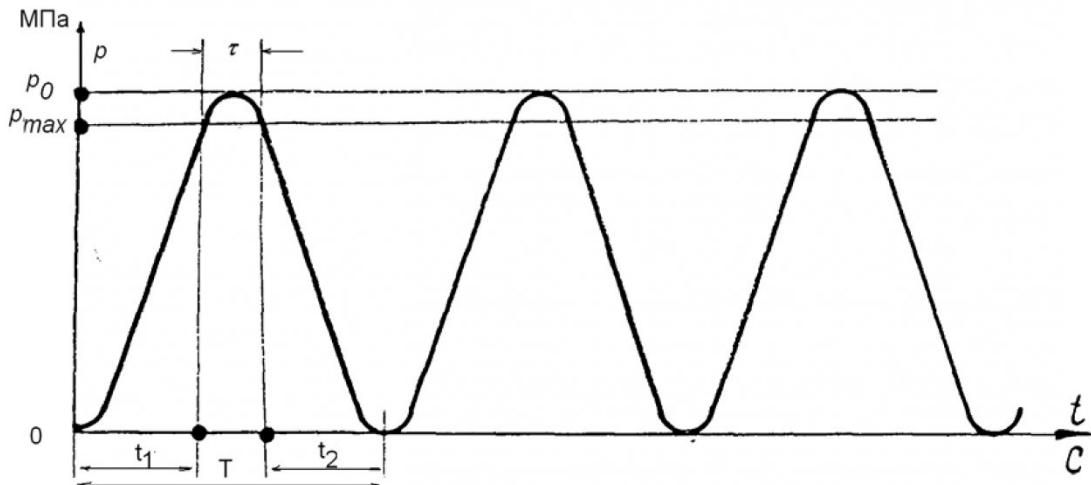


Рис. 1. Диаграмма изменения давления при гидроиспытании по разработанному методу:

$2t_1$ – время цикла нагружения-разгрузки, в течение которого давление жидкости в станине меньше P_{max} ; T – период нагружения-разгрузки; P_o – действительное максимальное давление жидкости в станине с учетом действия сил инерции, МПа

чивость. Данная операция осуществляется при существующей технологии нагружением изделия статическим внутренним давлением жидкости [1].

Разработанный метод заключается в нагружении изделия во время гидроиспытания циклически переменным внутренним давлением жидкости, что приводит к возникновению в его материале циклически переменных напряжений, действие которых обуславливает снижение остаточных напряжений.

Максимальная величина P_{max} циклически переменного внутреннего давления выбирается равной заданному по стандарту [4] статистическому давлению гидроиспытания. Для выполнения требований стандарта [4] к времени гидроиспытания суммарное время $t_{\Sigma H}$ циклов нагружения, в течение которого давление P не меньше заданного стандартом статистического давления гидроиспытания, задают не меньше времени t_{ucn} гидроиспытания, заданного по стандарту (рис. 1).

$$t_{\Sigma H} = \sum_{i=1}^N \tau_i \geq t_{ucn}, \quad (2)$$

где τ_i – время одного цикла нагружения–разгрузки, в течение которого давление жидкости в станине не меньше P_{max} , а исходя из (2) получено выражение для выбора общей длительности t_{obr} гидрообработки станин [1]:

$$t_{obr} \geq t_{ucn} \left[1 - \frac{1}{n} \arccos \left(1 - \frac{P_{max}}{P_o} \right) \right]^{-1}. \quad (3)$$

В соответствии с вышеизложенным, разработанный метод гидроиспытания отвечает требованиям стандарта, как по величине максимального давления жидкости, так и по длительности испытания этим давлением.

Таким образом, нагружение изделия во время гидроиспытания переменным давлением обеспечивает как проверку изделия на взрывоустойчивость, так и снижение в нем остаточных напряжений. Благодаря совмещению операции снижения остаточных напряжений с операцией гидроиспытания исключается необходимость в дополнительных производственных площадях и межоперационном транспортировании изделий, уменьшается общая трудоемкость изготовления, затраченные на изготовление и обслуживание оборудования, сокращается численность рабочих, что приводит к уменьшению себестоимости изготовления корпусных деталей.

При исследовании напряженно-деформированного состояния станин было установлено, что окончательная картина их напряженного состояния характеризуется большими полями и величинами растягивающих напряжений, которые обуславливают процесс интенсивной релаксации напряжений и являются главной причиной нестабильности размеров деталей АД. Для обеспечения стабильности размеров этих деталей необходимо снижение растягивающих остаточных напряжений до величины, не превышающей предел релаксации.

Основную роль в снижении остаточных напряжений играет та часть переменных напряжений от внешней нагрузки, которая по знаку совпадает с остаточными. Поэтому наиболее эффективным для снижения растягивающих остаточных напряжений является режим с пульсирующим циклом обработки (рис. 1), поскольку большую часть времени обработки с таким циклом в материале обрабатываемого изделия возникают растягивающие переменные напряжения от внешней нагрузки.

Однако в результате действия сил инерции при циклическом нагружении амплитуда действительных значений σ напряжений от внешней нагрузки превышает значения σ' напряжений от внешней нагрузки, устанавливаемых перед началом обработки настройкой вибратора. Увеличение амплитуды при резонансе составляет величину $2\Delta\sigma_{rez}$, в результате чего действительное значение минимальных напряжений от внешней нагрузки σ_{min} переходит в область отрицательных (сжимающих) значений (рис. 2).

Возникновение в определенной части цикла нагружения сжимающих переменных напряжений уменьшает время действия растягивающих, что приводит к уменьшению эффективности снижения растягивающих остаточных напряжений и увеличению степени снижения сжимающих. Снижение компоненты сжимающих остаточных напряжений неблагоприятно сказывается на качестве корпусных деталей, поскольку сжимающие остаточные напряжения способствуют повышению усталостной прочности, коррозийной стойкости и срока работоспособности изделия.

С целью повышения стабильности размеров и механических характеристик корпусных деталей АД (вторая задача) предложен режим гидрообработки, характеризуемый выражением:

$$\sigma_{\Sigma}^{min} = \sigma_{ocm}^P + \sigma_{min} \geq \sigma_{ocm}^P, \quad (4)$$

где σ_{Σ}^{min} – минимальное суммарное напряжение цикла нагружения; σ_{ocm}^P – любое значение поля окружности растягивающих остаточных напряжений; σ_{min} – минимальное действительное окружное напряжение цикла от внешней нагрузки.

При выполнении условия (4) в материале станины возникают переменные напряжения, в течение всего времени обработки совпадающие по знаку с растягивающими напряжениями. Благодаря этому, выполнение неравенства (1) обеспечивается в течение более длительного времени, чем в случае обработки с пульсирующим циклом изменения нагрузки. Это обеспечивает интенсивное и

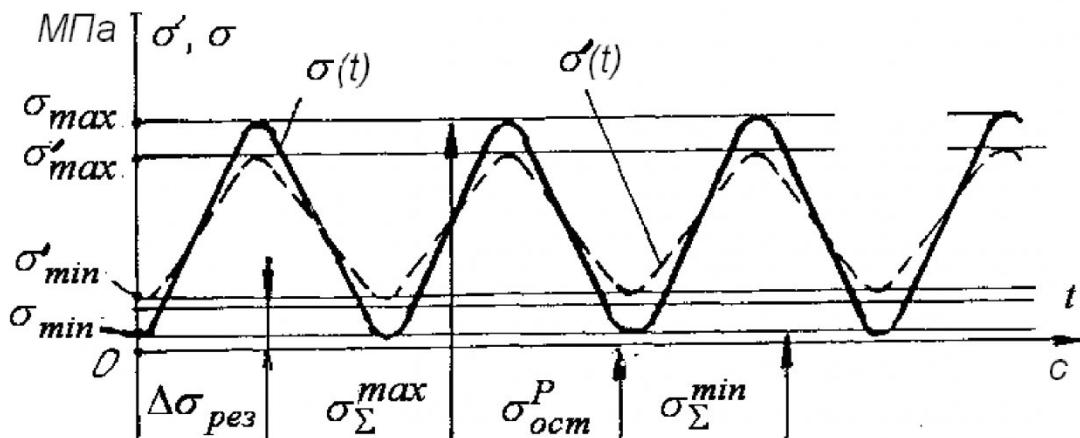


Рис. 2. Диаграмма изменения напряжений во времени при обработке с оптимальным режимом нагружения

эффективное снижение компоненты растягивающих остаточных напряжений и преимущественное сохранение компоненты сжимающих.

Величина минимального давления P_{min} цикла, обеспечивающего режим обработки в соответствии с условием (4) определяется выражением [1]:

$$P_{min} \geq \frac{E \cdot \Delta \bar{R}_{cm.h.max} \cdot S_{cm}}{\left(1 - \frac{\mu}{2}\right) R_{cm.h}^2} - P_{max}, \quad (5)$$

где $\Delta \bar{R}_{cm.h.max}$ – среднее значение максимальной радиальной деформации наружной поверхности обечайки станины; S_{cm} – толщина стенки обечайки станины; $R_{cm.h}$ – радиус наружной поверхности обечайки станины, мм; μ – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости 1-го рода, МПа; P_{max} – максимальная величина внутреннего давления цикла.

Для обоснованного выбора конкретных значений режимов гидровибробоработки корпусных деталей необходимо значение основных закономерностей, определяющих влияние режимов обработки на изменение параметров напряженного состояния и геометрических параметров изделий, а также закономерностей, определяющих влияние параметров напряженного состояния деталей на показатели их размерной нестабильности. Поэтому для выявления указанных закономерностей было проведено экспериментальное исследование гидровибрационного метода, которое осуществлялось на образцах типа "тонкостенная оболочка" с элементарной картиной напряженно-деформационного состояния [1].

Переменными входными параметрами были коэффициент асимметрии цикла $r = P_{min} / P_{max}$ и величины P_{max} и P_{min} давлений цикла. Исследуемыми выходными параметрами явились степень снижения растягивающих и сжимающих остаточных напряжений в образцах, величины изменения

ovalности и среднего диаметра образцов.

Влияние коэффициента асимметрии цикла на параметры напряженного состояния и геометрические параметры образцов исследовалось с помощью методов регрессионного анализа.

Максимальное давление цикла при обработке всех образцов выбрано равным давлению статического гидроиспытания станин АД АИМ, В, ВРП и составило 1 МПа.

Величина коэффициента асимметрии цикла варьировалась путем изменения минимального давления цикла и составляло соответственно 0; 0,25; 0,50; 0,75; 0,9,

После математической обработки результатов экспериментов получены следующие уравнения (%):

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{ost.icsx}^P}{\sigma_{ost.icsx}^P} &= 71,071 + 277,353r - \\ &\quad - 1097,653r^2 + 919,045r^3 \\ \frac{\sigma_{ost.icsx}^C}{\sigma_{ost.icsx}^C} &= 62,236 - 23,236r + \\ &\quad + 158,277r^2 - 149,123r^3 \\ \frac{\rho}{\rho_{icsx}} &= 89,315 + 8,144r + 9,545r^2 - 50,093r^3 \\ \frac{D - D_{icsx}}{\bar{D}_{icsx}} &= (0,3334 + 1,1946r - \\ &\quad - 2,7719r^2 + 1,7472r^3) \cdot 10^{-1}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\sigma_{ost.icsx}^P, \sigma_{ost}^P$ – величины растягивающих остаточных напряжений, соответственно, до и после гидровибробоработки, МПа; $\sigma_{ost.icsx}^C, \sigma_{ost}^C$ – то же для сжимающих напряжений, МПа; ρ_{icsx}, ρ – величины некруглостей внутренней поверхности образцов, соответственно, до и после гидровибробоработки, мм; \bar{D}_{icsx}, D – то же для средних диаметров внутренней поверхности образцов, мм.

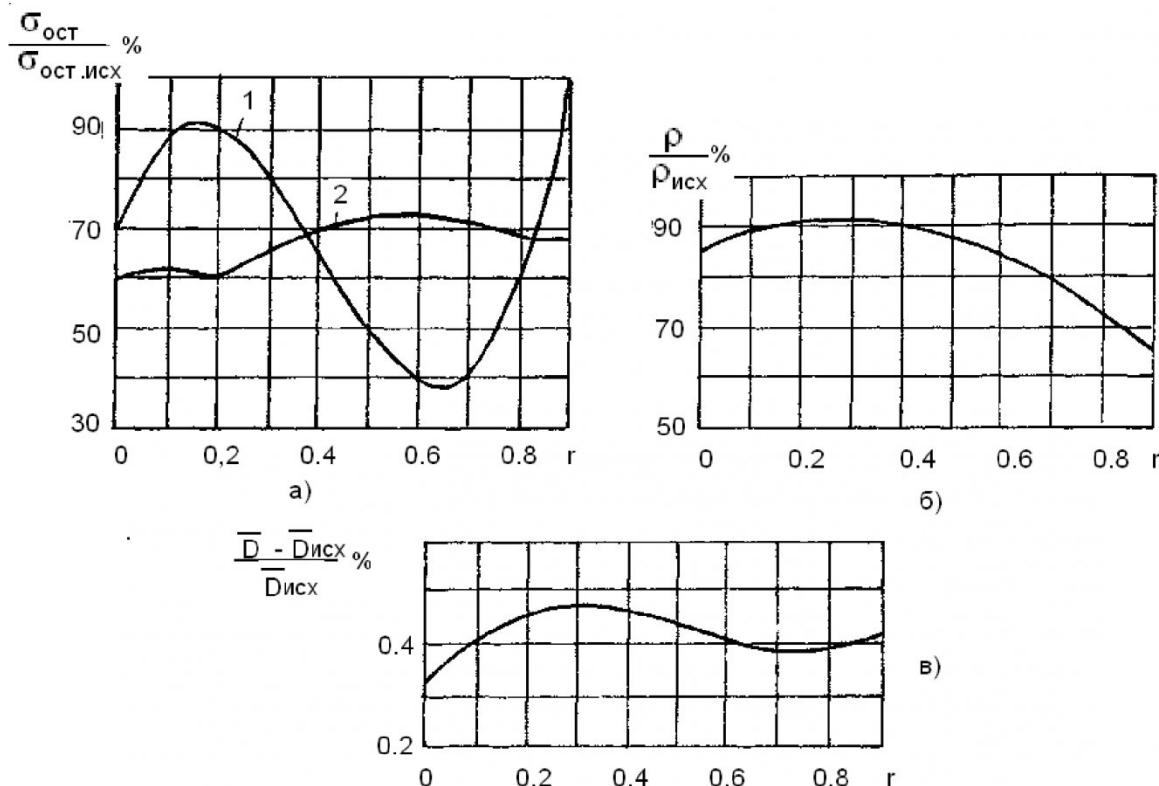


Рис. 3. Зависимости от коэффициента асимметрии цикла: степени снижения остаточных напряжений (а) (1 – растягивающих, 2 – сжимающих); изменения овальности (б) и среднего диаметра (в) внутренней поверхности тонкостенных оболочек

Построенные по уравнениям (6) диаграммы приведены на рис. 3.

Анализ уравнений (6) показывает, что с увеличением r происходит интенсивное снижение растягивающих остаточных напряжений σ_{ost}^P (рис. 3, а), которое объясняется увеличением времени действия растягивающей переменной нагрузки за счет снижения доли сжимающей, имеющей место в результате действия сил инерции при быстром падении давления до P_{min} . С увеличением r наблюдается и уменьшение процента снижения σ_{ost}^C , что также обусловлено уменьшением доли сжимающей внешней переменной нагрузки.

Полученные результаты свидетельствуют, что гидрообработка приводит к снижению овальности внутренней поверхности тонкостенных оболочек. Наиболее интенсивно этот эффект проявляется при $r > 0,4$ (рис. 3, б).

Эффект правки формы поперечных сечений тонкостенных оболочек может быть объяснен неравномерностью распределения по овальному поперечному сечению окружных напряжений от внешней нагрузки.

Степень увеличения внутреннего диаметра оболочек определяется соотношением величин растягивающих и сжимающих остаточных напря-

жений в их материале после гидровиброобработки.

При этом степень увеличения внутреннего диаметра тем выше, чем больше величина растягивающих остаточных напряжений после гидровиброобработки и меньше величина сжимающих (рис. 3, в).

Исследование влияния параметров цикла нагрузки на степень снижения остаточных напряжений и параметры размерной нестабильности сварных оболочек позволило получить следующие зависимости (%):

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \frac{\sigma_{ost}^P}{\sigma_{ost.isch}^P} = 53,034 - 5,932x_1 - \\
 &\quad - 25,037x_2 - 7,071x_1x_2; \\
 y_2 &= \frac{\sigma_{ost}^C}{\sigma_{ost.isch}^C} = 74,788 + 9,534x_1 - \\
 &\quad - 2,754x_2 + 3,178x_1x_2; \\
 y_3 &= \frac{\rho_m(v)}{\rho} = 133,064 - 19,674x_1 - 22,111x_2 + \\
 &\quad + 14,116x_3 - 9,456x_1x_2 - 11,144x_1x_3; \\
 y_n &= \frac{\overline{D}_m(v) - \overline{D}}{\overline{D}} = (9,316 - 2,001x_1 - 2,416x_1x_2 - \\
 &\quad - 3,320x_1x_3 + 1,670x_2x_3) \cdot 10^{-2},
 \end{aligned} \tag{7}$$

где x_1 и x_2 – соответственно, минимальное и максимальное давление цикла нагружения; x_3 – время после гидрообработки; $\rho_m(v)$ и $\bar{D}_m(v)$ – величины, соответственно, некруглостей и среднего диаметра внутренней поверхности образцов в момент времени $T(v)$ после гидровиброобработки, мм.

Анализ результатов эксперимента показывает, что гидровиброобработка позволяет снизить исходные растягивающие остаточные напряжения на 86 %.

Меняя величины P_{\min} и P_{\max} можно получить различное напряженное состояние в изделиях, в том числе наиболее благоприятное, при котором растягивающие остаточные максимально снижены, а сжимающие в значительное степени сохранены.

Показатели стабильности диаметра и формы сварных оболочек определяются величинами растягивающих и сжимающих остаточных напряжений в их материале.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса формирования остаточных напряжений и их влияния на геометрические и механические характеристики деталей позволили построить математические модели процесса гидровиброобработки станин АД.

Так для станин АД ВРП180S4 основные из них:

$$\begin{aligned} z_1 &= 57,154 - 4,965x_1 - 23,688x_2 - 7,913x_1x_2; \\ z_2 &= 71,968 + 6,376x_1 - 3,098x_2 + 3,937x_1x_2; \\ z_3 &= (4,189 + 1,022x_1 + 0,389x_2^2) \cdot 10^{-2}; \\ z_4 &= -81,721 - 6,016x_1 + 2,043x_2; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} z_5 &= (-3,719 + 1,030x_1x_2 - 0,903x_1x_2x_3) \cdot 10^{-2}; \\ z_6 &= 91,724 - 12,494x_2 - 13,184x_3 - 7,755x_1x_2 \end{aligned}$$

где z_1 и z_2 – соответственно, степень снижения растягивающих и сжимающих окружных остаточных напряжений, %; z_3 , z_4 – соответственно, изменение величин среднего диаметра и овальности внутренней поверхности станин в результате гидрообработки, %; z_5 , z_6 – соответственно, изменение величин среднего диаметра и овальности внутренней поверхности станин в момент времени T после гидрообработки, %; x_1 и x_2 – кодированное значение минимального и максимального давлений цикла; x_3 – кодированное значение времени T после гидрообработки.

На основании полученных математических моделей были рассчитаны оптимальные для повышения качественных характеристик станин режимы гидрообработки, разработаны технологические варианты гидрообработки и гидроиспытания станин.

Результаты исследований и разработанный метод гидровиброобработки станин АД внедрены в действующее производство взрывозащищенных АД на ПО "Кузбассэлектромотор".

Применение разработанного метода в производстве позволило снизить относительную неравномерность воздушного зазора выпускаемых АД от 16,4 % до 28,6 %, что, в свою очередь, привело к снижению рассеяния показателей назначения и к повышению качественных показателей АД [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полетаев, В. А. Управление качеством при проектировании и изготовлении взрывозащищенных асинхронных двигателей / В. А. Полетаев, Н. Г. Розенко, А. В. Сорокин – Кемерово: Изд-во Кузбасского политехн. ин-та, 1993. – 357 с.
2. Мернин, Б. В. Электрогидравлическая обработка сварных корпусных деталей / Б. В. Мернин, Е. Н. Оленин, А. М. Шкатова // Сварочное производство, 1982. – № 4. – С.4-5.
3. Сагалевич, В. М. Стабильность сварных соединений и конструкций / В. М. Сагалевич, В. Ф. Савельев. – М.: Машиностроение, 1986. – 264 с.
4. ГОСТ 227826-81. Электрооборудование взрывозащищенное с видом защиты "взрывонепроницаемая оболочка". Технические требования и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 67 с.

Авторы статьи:

Полетаев
Вадим Алексеевич
– докт.техн.наук, профессор, зав.
каф. информационных и автомати-
зованных производственных сис-
тем КузГТУ.
Тел. 8-3842-39-69-44;
e-mail: pva@kuzstu.ru.

Чичерин
Иван Владимирович
– канд.техн.наук, доц. каф. инфор-
мационных и автоматизированных
производственных систем КузГТУ
Тел. 8-3842-39-69-44;
e-mail: chicivan@narod.ru.