

УДК 622.002.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ОБОЛОЧЕК, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ СБОРКЕ КОРПУСОВ ГЕОХОДА

THE OPTIMIZATION OF SHELLS DEVIATIONS RESULTING FROM AN ASSEMBLY OF GEOKHOD'S BODIES

Вальтер Александр Викторович^{1,2},

кандидат техн. наук, младший научный сотрудник, доцент, e-mail: awalter@tpu.ru

Walter Alexander V.^{1,2}, C. Sc. (Engineering), Associate professor

Аксенов Владимир Валерьевич^{1,2},

доктор техн. наук, заведующий лабораторией, e-mail: 55vva42@mail.ru

Aksenov Vladimir V.^{1,2}, Dr. Sc., Head of laboratory

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, 652065, Кемерово, Россия, просп. Ленинградский, 10

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the RAS. Russia, Kemerovo, Leningradskiy ave., 10

² Юргинский технологический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 652055, Россия, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26

²Yurga Institute of Technology, TPU affiliate. Russia, Yurga, Leningradskaya str., 26

Аннотация. Работа посвящена вопросам повышения качества изготовления корпусов геоходов. Испытания опытного образца геохода модели 401 показали, что точность оболочек корпусов непосредственно влияет на эксплуатационные характеристики машины и требует существенного ужесточения. Отклонения оболочек, возникающие при сборке, находятся вблизи предельно допустимых значений. Актуальность работы заключается в выраженной потребности в повышении геометрической точности оболочек и создании научно-методической базы для разработки эффективных технологий изготовления корпусов.

Целью работы является разработка методики оптимизации отклонений оболочек, возникающих при сборке корпусов геохода, путем назначения рациональных параметров наладки сборки.

В работе используются методы математического моделирования, основанные на точностном анализе процессов сборки и нелинейном программировании.

Результатом работы является процедура расчета интегральной оценки точности оболочек корпусов геохода – отклонения, основанная на модели формирования погрешностей в процессе сборки. Полученные выражения позволили сформулировать задачу оптимизации отклонения в условиях ограничений для допусков и параметров наладки. В работе дано решение указанной задачи оптимизации в области внешних параметров, соизмеримых с требованиями, которые были установлены к изделиям опытного образца геохода. Полученное решение может быть использовано при разработке технологических решений, обеспечивающих точность оболочек в процессе производства корпусов, а также при назначении обоснованных требований к точности секторов.

Ключевые слова: Геоход, оболочка, отклонение, точностной анализ, нелинейное программирование, оптимизация, допуск.

Abstract. The article reviews the issues of improving the quality of geokhod shells manufacture. Testing of the prototype model of the geokhod '401' has shown that the accuracy of the bodies' shells directly affects the performance of the machine and requires a substantial improving. Deviations of shells that occur during assembly are close to the maximum allowable values. The urgency of the issue under review comes from the need to increase the geometric accuracy of the shells and to create the scientific and methodological basis for the development of effective technologies for manufacturing of the shell bodies.

The main aim of the study is to develop methods of optimization of shell deviations which occur during the geokhod body assembly by setting the rational parameters for assembly adjustment.

The methods used in the study are based on mathematical modeling, an analysis of the accuracy of assembly processes and nonlinear programming.

The result of the study is the procedure for calculation of the integral evaluation of the accuracy of the geohod body shells that is based on the model of errors formation in the process of assembling. These expressions allowed formulation of the deviation optimization problem in conditions of restrictions for the tolerances and adjustment parameters. This paper gives the solution to this optimization task in the field of external parameters, commensurate with the requirements that have been established for products of a test geokhod model. The resulting solution can be used in the development of technological solutions to ensure the accuracy of the shells in the process of bodies manufacturing as well as when setting up the reasonable accuracy requirements to the sectors.

Keywords: Geokhod, shell, deviation, analysis of accuracy, nonlinear programming, optimization, tolerance.

Геоход как предмет производства, подлежащий изготовлению, имеет выраженную технологическую специфику, обусловленную как конструктивными особенностями машины, так и особенностями её эксплуатации и ввода в эксплуатацию [1]. Наиболее полно технологическая специфика проявляется в следующих изделиях геохода: головная секция, стабилизирующая секция и внешний кор-

геометрическая точность оболочки непосредственно влияет на эксплуатационные характеристики машины [3]. Отклонения размеров оболочки и ее биение относительно конструктивной оси приводят к снижению энергоэффективности геохода, интенсификации изнашивания внешних поверхностей, повышению нагрузки на трансмиссию геохода и вероятности его заклинивания в выработке,

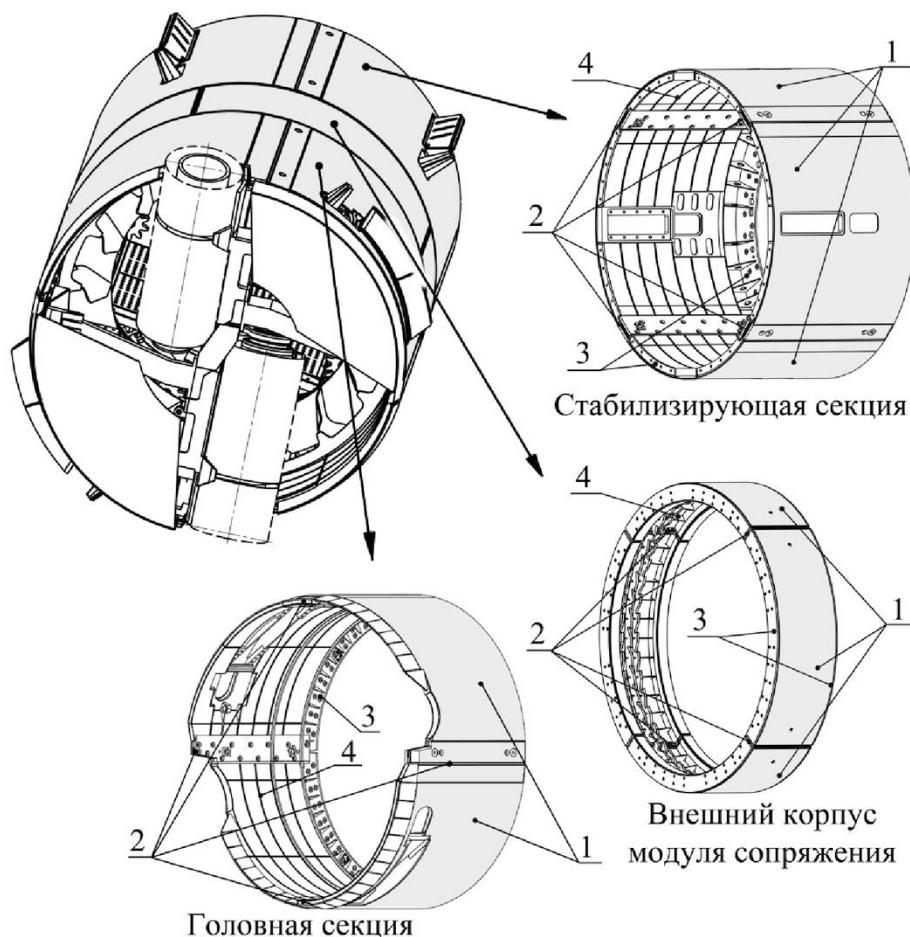


Рис. 1. Общие виды опытного образца геохода модели 401 и его корпусов: 1 – секторы, 2 – замки, 3 – фланцы, 4 – элементы жёсткости

пус модуля сопряжения (см. рис. 1). Данные крупногабаритные корпуса геохода являются не только базовыми несущими элементами геохода, но и контактируют наружной поверхностью (оболочкой) с геосредой [2]. Оболочка отделяет внутреннее пространство геохода от геосреды и обуславливает взаимодействие с ней машины. Вследствие этого

нарушению устойчивости при движении по трассе и возникновению поперечных перемещений геохода в процессе его врезания в горный массив [4].

Перечисленные выше корпуса имеют общие конструктивные признаки (см. рис. 1):

1) Корпуса являются крупногабаритными и имеют цилиндрические оболочки (для геохода модели 401 диаметр оболочек составляет 3200 мм);



а) б)

Рис. 2. Изготовление корпусов геохода: а) головная секция с технологическими планками после предварительной сборки; б) готовые головная секция и внешний корпус модуля сопряжения в сборе

- 2) Корпуса являются разъемными и состоят из четырех секторов 1, соединенных штифтами и болтами по замкам 2;
- 3) Корпуса имеют фланцы 3 для их соединения с сопрягаемыми корпусами и элементы жесткости 4 (шпангоуты и стрингеры).

В ходе НИОКР, проведенных при разработке и постановке на производство геохода модели 401 [5], к оболочкам корпусов геохода были установлено требование к отклонению их диаметра в пределах 20 мм. В процессе постановки на производство была разработана и реализована технология изготовления корпусов, построенная по схеме, характерной для тяжелого машиностроения [6]. Технология заключается в выверке взаимного положения обечаек секторов при сборке и их временной фиксации планками (рис. 2) с дальнейшей установкой заранее собранных замков, после чего производится сборка сваркой прочих элементов конструкции корпуса. Более подробные сведения о порядке и схеме сборки приведены в работе [7].

Для установления фактической точности оболочки опытного образца геохода осуществлялся координатный контроль корпусов [8; 9]. Контроль выполнялся мобильной координатно-измерительной машиной FARO Arm Edge 9. Полученные координаты поверхностей оболочек подвергались анализу в специально разработанном программном обеспечении [10]. Результаты анализа показали, что отклонения оболочек от заданного размера находятся в пределах установленного допуска, но лежат вблизи его границ, что при серийном производстве может приводить к возникновению брака. Установлено, что наиболее существенными факто-

ром, влияющим на погрешность оболочки, являются погрешности изготовления поступающих на сборку обечаек и погрешность их взаимного расположения при сборке [11]. Совместно эти два фактора обуславливают от 40 до 60% величины отклонений, т. е. являются важнейшей составляющей технологической размерной цепи, изменение расстояний в которых в пределах установленных допусков вызывает геометрические погрешности оболочек [12].

Таким образом, возникает задача установить требования к данным расстояниям: к точности обечеек корпусов и к точности их взаимного расположения при сборке с целью обеспечения минимальных значений отклонений оболочек.

Для решения подобных задач была разработана математическая модель, связывающая параметры точности в процессе сборки с выходными характеристиками отклонений и основанная на точностном анализе процесса [13–15]. Модель является модификацией модели, представленной в работе [16], и графически выражается расчетной схемой, приведенной на рис. 3.

Модель описывает погрешности оболочки, рассматривая разницу положений точек номинального профиля оболочки, заданного конструкторской документацией, и соответствующих точек отдельных обечеек корпуса. Подобные модели широко используются для описания механизмов возникновения погрешностей при сборке сегментных корпусов [17; 18]. В разработанной модели погрешности вызваны разницей в положении действительного центра обечайки и номинального центра оболочки, а также различной величиной радиусов номинального профиля оболочки и обечайки сектора.

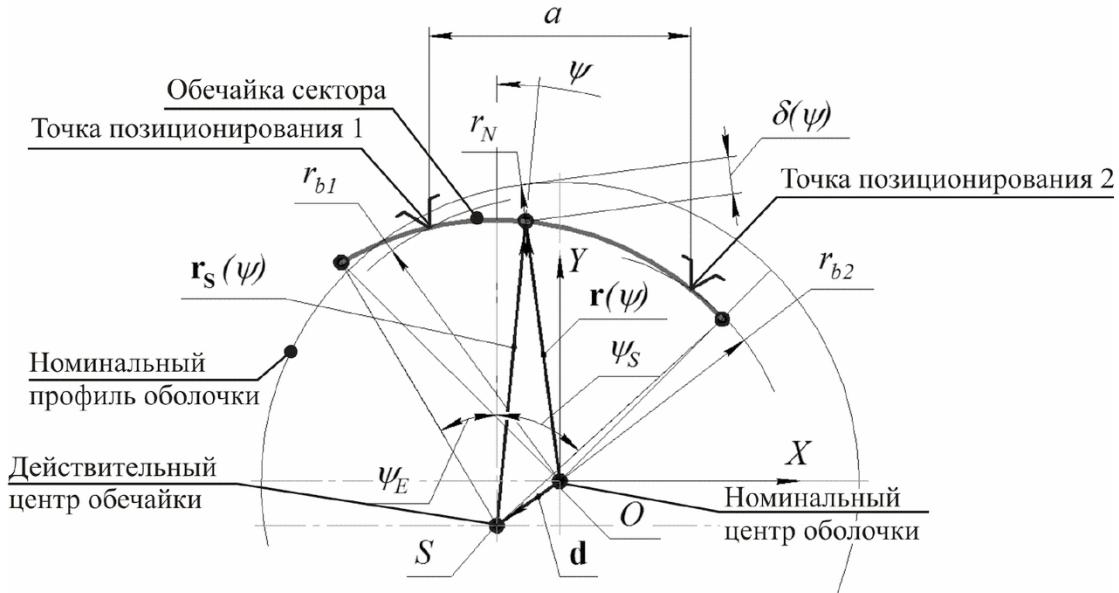


Рис. 3. Общие виды опытного образца геохода модели 401 и его корпусов: 1 – секторы, 2 – замки, 3 – фланцы, 4 – элементы жёсткости

Эти различия обусловлены как неизбежным отличием действительных размеров обечаек от номинальных, так и погрешностью в расположении точек позиционирования – местах по которым выполняется базирование обечаек при сборке [19]. Такими точками являются точки, по которым производится контроль положения обечаек при сборке (выверка), или точки по которым обечайка устанавливается на опоры приспособления [20].

Из схемы следует, что отклонение оболочки от заданного размера определяется как максимальное значение модуля погрешности на рассматриваемом участке оболочки [21]:

$$\Delta = \max |\delta(\psi)| \mid \psi \in [\psi_S; \psi_E];$$

$$\delta(\psi) = |\mathbf{r}(\psi)| - r_N;$$
(1)

где $\delta(\psi)$ – погрешность оболочки; $\mathbf{r}(\psi)$ – радиус-вектор точек обечайки; r_N – номинальный радиус оболочки; ψ_S и ψ_E – начальное и конечное значения угловой координаты для рассматриваемой обечайки:

$$\psi_S = -\arcsin \frac{q_{2x}}{r_S}; \psi_E = -\arcsin \frac{q_{1x}}{r_S};$$

$$q_{1x} = -d_x - \left(\frac{1}{2}(d_y - d_x) + \frac{\sqrt{2}}{2}g_1 \right);$$

$$q_{2x} = -d_x + \left(\frac{1}{2}(d_y + d_x) + \frac{\sqrt{2}}{2}g_2 \right);$$

$$g_1 = \sqrt{\frac{1}{2}d_x^2 - d_x d_y + \frac{1}{2}d_y^2 + r_S^2 - d_x^2 - d_y^2};$$

$$g_2 = \sqrt{\frac{1}{2}d_x^2 + d_x d_y + \frac{1}{2}d_y^2 + r_S^2 - d_x^2 - d_y^2};$$

где d_x и d_y – координаты вектора \mathbf{d} смещения действительного центра обечайки (см. рис. 3), r_S – радиус обечайки.

Выражение может быть переписано в виде:

$$\Delta = \max \{|\delta_{\max}|; |\delta_{\min}|\};$$
(1)

где δ_{\max} и δ_{\min} – максимальное и минимальное значение $\delta(\psi)$ на рассматриваемом участке.

Максимальные и минимальные значения погрешностей из выражения (1) могут быть найдены как максимальное и минимальное из ряда конкурирующих значений:

$$\delta_{\max} = \max \begin{cases} \delta_I, (\psi_S \leq \psi_I \leq \psi_E) \wedge ((d_x \neq 0) \vee (d_y \neq 0)); \\ \emptyset, (\psi_S > \psi_I) \vee (\psi_I > \psi_E) \vee ((d_x = 0) \wedge (d_y = 0)); \\ \delta(\psi_S); \delta(\psi_E) \end{cases}$$

$$g_1 = \sqrt{\frac{1}{2}d_x^2 - d_x d_y + \frac{1}{2}d_y^2 + r_S^2 - d_x^2 - d_y^2};$$

$$g_2 = \sqrt{\frac{1}{2}d_x^2 + d_x d_y + \frac{1}{2}d_y^2 + r_S^2 - d_x^2 - d_y^2};$$

где δ_I – значение погрешности в точке экстремума.

Значение погрешности в точке экстремума:

$$\delta_I = \sqrt{r_S^2 \left(\cos^2 \frac{d_y}{d} - \cos^2 \frac{d_x}{d} + 1 \right) + 2r_S \left(d_y \cos \frac{d_y}{d} + d_x \sin \frac{d_x}{d} \right) + d_x^2 + d_y^2}$$

где d – модуль вектора \mathbf{d} .

Значения компонентов вектора \mathbf{d} определяются выражением:

$$d_x = -\frac{h}{2a} \left(h - \frac{a^2h + h^3 + c}{(a^2 + h^2)} \right);$$

$$d_y = h_2 - \frac{a^2h + h^3 + c}{2(a^2 + h^2)};$$

$$c = \sqrt{-a^2(a^2 + h^2)(a^2 + h^2 - 4r_s^2)};$$

$$h = h_2 - h_1;$$

$$h_1 = \frac{1}{2}\sqrt{4r_{b1}^2 - a^2};$$

$$h_2 = \frac{1}{2}\sqrt{4r_{b2}^2 - a^2};$$

где r_{b1} и r_{b2} – расстояния до точек позиционирования, a – расстояние между точками позиционирования.

Таким образом, величина отклонений зависит от пяти параметров модели:

- 1) Номинальный радиус обечайки – r_N ;
- 2) Радиус обечайки – r_s ;
- 3) Расстояние между точками позиционирования – a ;
- 4) Расстояние до точки позиционирования 1 – r_{b1} ;
- 5) Расстояние до точки позиционирования 2 – r_{b2} .

Номинальный радиус обечайки – r_N является величиной неизменной, поскольку его значение жестко устанавливается конструкторской документацией.

Остальные параметры являются величинами переменными. Диапазон изменения r_s , r_{b1} и r_{b2} определяется установленными на них допусками. Расстояние между точками позиционирования a – важнейший параметр технологической наладки сборки.

В работе [16] показано, что расстояние a определяет возникающие величины погрешности и его обоснованное назначение позволяет значимо повысить точность сборки.

Приняв поле допуска каждого из параметров симметричным, и учитывая, что параметры r_{b1} и r_{b2} равноправны, можем, используя метод максимумы-минимума, определить предельную величину отклонения, которое может иметь оболочка при установленных значениях допусков и заданном расстоянии между точками позиционирования a :

$$\Delta_0(r_N, a, T_S, T_b) = \max \Delta(r_N, r_s, a, r_{b1}, r_{b2});$$

$$r_N = \text{const};$$

$$r_s \in \left[r_N - \frac{1}{2}T_S; r_N + \frac{1}{2}T_S \right];$$

$$a = \text{const};$$

$$r_{b1} \in \left[r_N - \frac{1}{2}T_b; r_N + \frac{1}{2}T_b \right]; \quad (2)$$

$$r_{b2} \in \left[r_N - \frac{1}{2}T_b; r_N + \frac{1}{2}T_b \right];$$

где T_S и T_b – допуски на радиус обечайки и на расстояния r_{b1} , r_{b2} соответственно.

С использованием выражения (2) может быть поставлена задача оптимизации, заключающаяся в определении таких параметров сборки, при которых обеспечивается наивысшая точность оболочки. Параметры T_S и T_b должны быть исключены из списка переменных оптимизации, поскольку зависимость от них Δ_0 имеет однозначный характер – минимум Δ_0 всегда достигается при минимальных значениях T_S и T_b . Таким образом, задача оптимизации может быть сформулирована в следующем виде: найти такое расстояние между опорами, которое обеспечивает минимальное значение отклонения Δ_0 при установленных величинах допусков T_S и T_b . Такая постановка соответствует нелинейной задаче условной оптимизации и в нотации, примененной в [22], выражается следующим:

Найти:

$$\Delta_{\min} = \min_a \Delta_0(r_N, a, T_S, T_b).$$

При ограничениях:

$$a \in (0; a_{\max}]; \quad a_{\max} \approx r_N \sqrt{2};$$

$$r_N = \text{const}; \quad r_N \in +\mathbf{R};$$

$$T_S = \text{const}; \quad T_S \in +\mathbf{R};$$

$$T_b = \text{const}; \quad T_b \in +\mathbf{R}.$$

Альтернативная постановка задачи оптимизации приведена в работе [23] и заключается в оптимизации не точности, а допусков. Для решения поставленной задачи оптимизации была разработана программа, блок-схема которой приведена на рис. 4. Программа в циклах перебирает значения констант внешних условий и для каждой пары допусков T_S и T_b проводит оптимизацию функции Δ_0 по переменной a методом золотого сечения и параболической интерполяции. При вычислении значения функции подпрограмма оптимизации обращается к подпрограммам, вычисляющим экстремальные значения погрешности, область определения функции погрешности и вектор смещения центра обечайки. Результатом является пара двумерных массивов, содержащих оптимальные значения расстояния между точками позиционирования a_{\min} и величины отклонения Δ_{\min} при оптимальном расстоянии.

На рис. 5 приведено решение задачи оптимизации для условий, соответствующих оболочкам корпусов геохода модели 401, номинальный радиус оболочки принят $r_N = 1600$ мм. Оптимизация проведена в пространстве параметров: $T_S = 1\dots20$ мм,

$T_b = 1 \dots 20$ мм.

Наиболее важным результатом решения задачи оптимизации является то, что оптимальное расстояние между точками позиционирования зависит от величины допусков T_S и T_b . В исследуемой области параметров a_{min} изменяется на величину более чем

на 180 мм. Это означает, что для достижения наивысшей точности необходимо при проектировании наладки на сборку корпусов назначать различные значения на расстояние между точками позиционирования a в зависимости от указанных допусков. С увеличением допуска на радиус обечайки

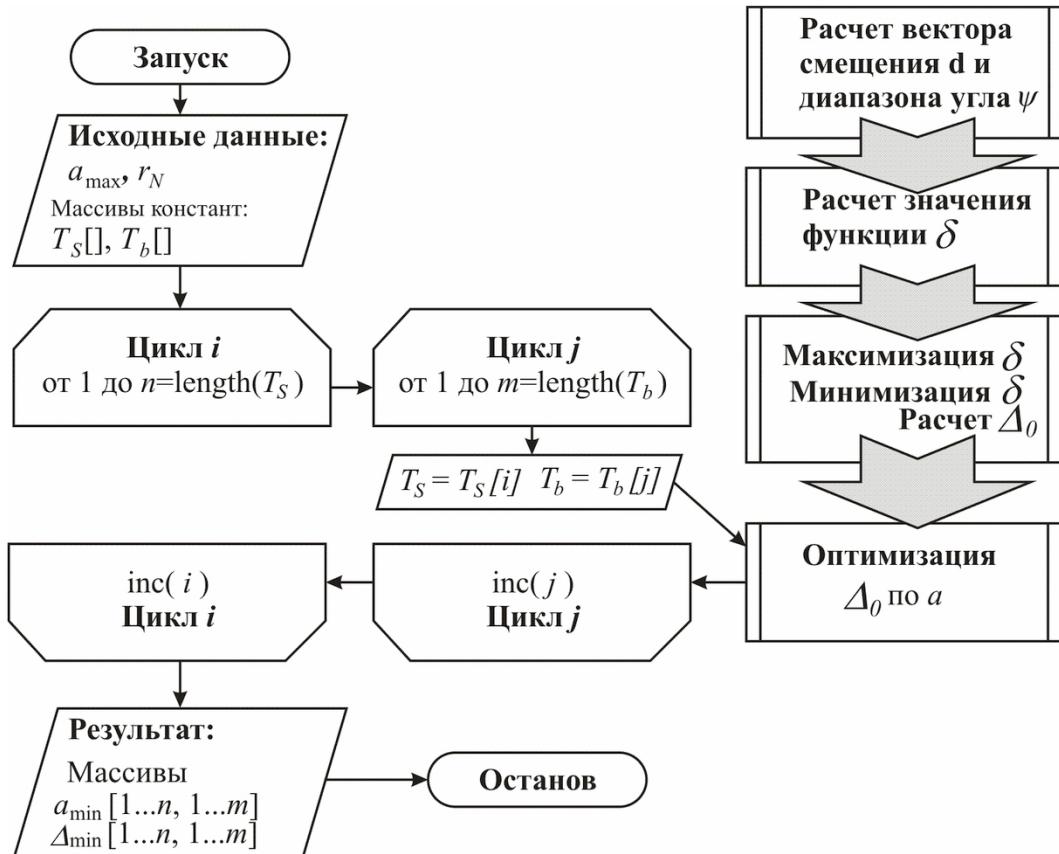


Рис. 4. Блок-схема программы оптимизации отклонений оболочек

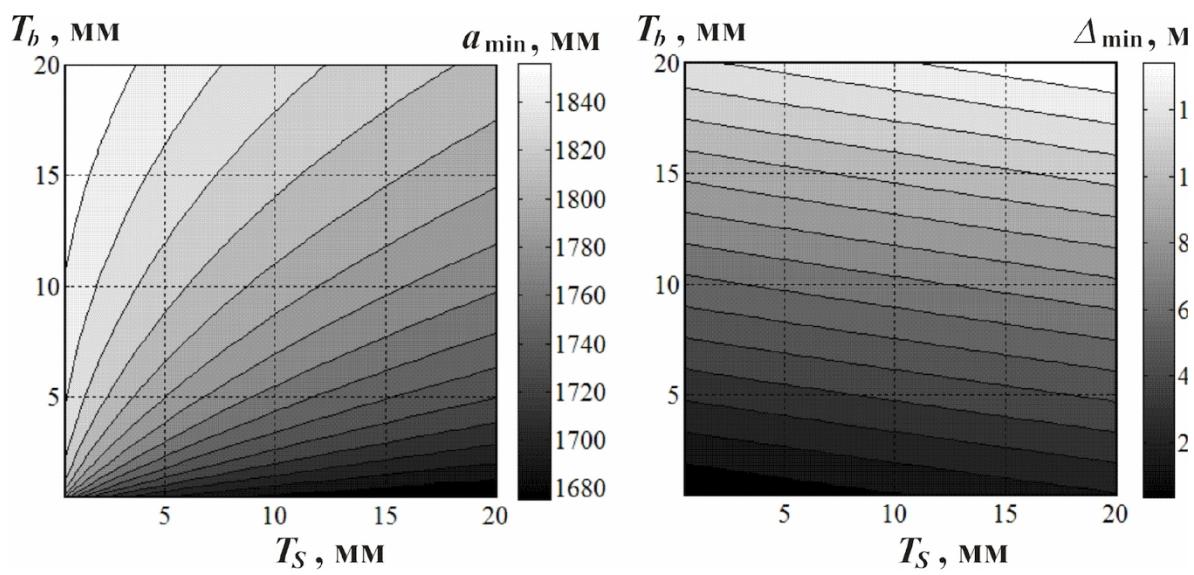


Рис. 5. Результаты оптимизации отклонений оболочек: а) оптимальное расстояние между точками позиционирования; б) значение целевой функции (предельная величина отклонений) в точках a_{min}

T_S следует уменьшать расстояние a . С увеличением допуска T_b следует увеличивать расстояние a .

Оптимальное значение отклонения от заданного размера зависит от допусков T_S , T_b и с их увеличением также увеличивается. При анализе величины Δ_{min} необходимо отметить, что величина допуска T_b влияет на точность оболочки в гораздо большей степени, чем допуск T_S . При любых условиях величина оптимального отклонения меньше величины допусков T_S и T_b . Это означает, что в любом случае может быть найдено такое расстояние между точками позиционирования, которое обеспечивает в процессе сборки точность оболочки более высокую, чем точность отдельных секторов и точность их позиционирования.

Оптимизация величины отклонения показывает, что для достижения оптимального значения необходимо изменять расстояние между точками позиционирования в технологической наладке в зависимости от допусков на радиус обечайки и расстояние до точек позиционирования. Значение оптимального расстояния между точками позиционирования всегда превышает величину номинального радиуса обечайки. Разработанная процедура оптимизации и полученное решение могут быть использованы при разработке технологических решений, обеспечивающих установленную точность оболочек корпусов геохода в процессе их производства, а также при назначении обоснованных требований к точности секторов корпусов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Efremenkov A.B. Forming the subterranean space by means of a new tool (geohod) / A.B. Efremenkov // 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2011): Proceedings: in 2 vol. – IEEE, 2011. – Vol. 1. – P. 348-350.
2. Капустин А.Н. Предпосылки разработки формы корпуса геохода // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 150-летию со дня рождения академика В. А. Обручева и 130-летию академика М. А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы. – 2013. – Т. 2. – С. 320-321.
3. Капустин А.Н. Определение основных требований к корпусу (носителю) горнопроходческой машины нового класса / А.Н. Капустин, В.Ю. Бегляков // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы III Международной науч.-практ. конф. – Междуреченск: КузГТУ, 2014. – С. 16-17.
4. Блащук М.Ю. Математическая модель для определения усилий, необходимых для перемещения геохода / М.Ю. Блащук, А.А. Дронов, Д.А. Михеев // Сборник трудов Международной научно-практической конференции Актуальные проблемы современного машиностроения. – Юрга: ЮТИ ТПУ: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 134-139.
5. Опыт участия в проекте по организации высокотехнологичного производства / В.В. Аксенов [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 8 (126). – С. 8-15.
6. Arai T. Assembly of Suspended Heavy Works / T. Arai, H. Ohsumi, H. Makino // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 1990. – Vol. 39. – № 1. – P. 37-40.
7. Вальтер А.В. Варианты обеспечения точности оболочек и собираемости корпусов геохода / А.В. Вальтер, В.В. Аксенов // Механики XXI веку. – 2015. – № 14. – С. 89-92.
8. Координатно-измерительные машины и комплексы / А.И. Пекарщ [и др.] // Наука и технологии в промышленности. – 2011. – № 3. – С. 36-48.
9. Кристоф Р. Технология мультисенсорных координатных измерений. Контроль форм, размеров и позиций на производстве и в процессе контроля качества / Р. Кристоф, Х.И. Нейман. – М.: Corpotate Media, 2004. – 64 с.
10. Вальтер А.В. Математическое обеспечение обработки данных координатного контроля оболочки геохода / А.В. Вальтер, В.В. Аксенов, П.А. Чазов // Технологии и материалы. – 2015. – № 3. – С. 4-9.
11. Вальтер А.В. Определение величины и характера геометрических погрешностей оболочки модуля сопряжения опытного образца геохода / А.В. Вальтер, В.В. Аксенов, Р.В. Чернухин // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 42-47.
12. Laperrière L. Tolerance Analysis and Synthesis Using Jacobian Transforms / L. Laperrière, H.A. ElMaraghy // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2000. – Vol. 49. – № 1. – P. 359-362.
13. Медарь А.В. Точностной анализ в технологическом проектировании сборочных процессов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 1 (102). – С. 37-42.
14. Зибров П.Ф. Проблема математического моделирования точности в технологии машиностроения // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2012. – № 1. – С. 57-61.
15. A multivariate statistical analysis of sampling uncertainties in geometric and dimensional errors for circular features / H. Ramaswami [et al.] // Journal of Manufacturing Systems. – 2006. – Vol. 25. – № 2. – P. 77-94.
16. Вальтер А.В. Аналитическая модель формирования отклонений биения, возникающих при сборке корпусов геохода / А.В. Вальтер, Ш.С. Нозирзода // Технологии и материалы. – 2016. – № 4. – С. 4-8.

17. Lowth S. An assessment of “variation conscious” precision fixturing methodologies for the control of circularity within large multi-segment annular assemblies / S. Lowth, D.A. Axinte // Precision Engineering. – 2014. – Vol. 38. – P. 379-390.
18. Memon M. Minimizing Assembly Errors by Selecting Optimum Assembly Sequence in the Assembly of a Rigid Circular Structure / M. Memon, T. Hussain, Z.A.L.I. Memon // Mehran University Research Journal of Engineering & Technology. – 2012. – Vol. 31. – № 4. – P. 743-754.
19. Das A. Fixture Design Optimisation Considering Production Batch of Compliant Non-Ideal Sheet Metal Parts / A. Das, P. Franciosa, D. Ceglarek // Procedia Manufacturing. – 2015. – Vol. 1. – P. 157-168.
20. Аксенов В.В. Настройка положения опор методом триангуляции при сборке секций геохода / В.В. Аксенов, А.В. Вальтер, С.Е. Лагунов // Технологии и материалы. – 2015. – № 1. – С. 31-36.
21. ГОСТ Р 53442-2015 (ИСО 1101:2012). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Установление геометрических допусков. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения.
22. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
23. Cheng B.-W. Optimization of mechanical assembly tolerances by incorporating Taguchi's quality loss function / B.-W. Cheng, S. Maghsoodloo // Journal of Manufacturing Systems. – 1995. – Vol. 14. – № 4. – P. 264-276.

REFERENCES

1. Efremenkov A.B. Forming the subterranean space by means of a new tool (geohod) / A.B. Efremenkov // 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2011): Proceedings: in 2 vol. – IEEE, 2011. – Vol. 1. – P. 348-350.
2. Kapustin A.H. Predposylki razrabotki formy korpusa geohoda // Problemy geologii i osvoenija nedr: Trudy XVII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodyh uchenyh, posvjashchennogo 150-letiju so dnja rozhdenija akademika V. A. Obrucheva i 130-letiju akademika M. A. Usova, osnovatelej Sibirskoj gorno-geologicheskoy shkoly. – 2013. – T. 2. – S. 320-321.
3. Kapustin A.N. Opredelenie osnovnyh trebovaniy k korpusu (nositelju) gornoprophodcheskoj mashiny novogo klassa / A.N. Kapustin, V.Ju. Begljakov // Sovremennye tendencii i innovacii v nauke i proizvodstve: Materialy III Mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf. – Mezhdurechensk: KuzGTU, 2014. – S. 16-17.
4. Blashhuk M.Ju. Matematicheskaja model' dlja opredelenija usilij, neobhodimyh dlja peremeshhenija geohoda / M.Ju. Blashhuk, A.A. Dronov, D.A. Miheev // Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Aktual'nye problemy sovremennoj mashinostroenija. – Jurga: JuTI TPU: Izd-vo TPU, 2014. – S. 134-139.
5. Opyt uchastija v proekte po organizacii vysokotehnologichnogo proizvodstva / V.V. Aksenov [i dr.] // Gornoje oborudovanie i jelektromehanika. – 2016. – № 8 (126). – S. 8-15.
6. Arai T. Assembly of Suspended Heavy Works / T. Arai, H. Ohsumi, H. Makino // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 1990. – Vol. 39. – № 1. – P. 37-40.
7. Val'ter A.V. Varianty obespechenija tochnosti obolochek i sobiraemosti korpusov geohoda / A.V. Val'ter, V.V. Aksenov // Mehaniki XXI veku. – 2015. – № 14. – S. 89-92.
8. Koordinatno-izmeritel'nye mashiny i kompleksy / A.I. Pekarshh [i dr.] // Nauka i tehnologii v promyshlennosti. – 2011. – № 3. – S. 36-48.
9. Kristof R. Tehnologija mul'tisensornyh koordinatnyh izmerenij. Kontrol' form, razmerov i pozicij na proizvodstve i v processe kontrolja kachestva / R. Kristof, H.I. Nejman. – M.: Corpotate Media, 2004. – 64 s.
10. Val'ter A.V. Matematicheskoe obespechenie obrabotki dannyh koordinatnogo kontrolja obolochki geohoda / A.V. Val'ter, V.V. Aksenov, P.A. Chazov // Tehnologii i materialy. – 2015. – № 3. – S. 4-9.
11. Val'ter A.V. Opredelenie velichiny i haraktera geometricheskikh pogreshnostej obolochki modulja soprazhnenija optychnogo obrazca geohoda / A.V. Val'ter, V.V. Aksenov, R.V. Chernuhin // Aktual'nye problemy v mashinostroenii. – 2016. – № 3. – S. 42-47.
12. Laperrière L. Tolerance Analysis and Synthesis Using Jacobian Transforms / L. Laperrière, H.A. ElMaraghy // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2000. – Vol. 49. – № 1. – P. 359-362.
13. Medar' A.V. Tochnostnoj analiz v tehnologicheskem proektirovaniyu sborochnyh processov // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. – 2009. – № 1 (102). – S. 37-42.
14. Zibrov P.F. Problema matematicheskogo modelirovaniya tochnosti v tehnologii mashinostroenija // Vektor nauki Tol'jattinskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2012. – № 1. – S. 57-61.
15. A multivariate statistical analysis of sampling uncertainties in geometric and dimensional errors for circular features / H. Ramaswami [et al.] // Journal of Manufacturing Systems. – 2006. – Vol. 25. – № 2. – P. 77-94.
16. Val'ter A.V. Analiticheskaja model' formirovaniya otklonenij bienija, voznikajushhih pri sborke korpusov geohoda / A.V. Val'ter, Sh.S. Nozirzoda // Tehnologii i materialy. – 2016. – № 4. – S. 4-8.

17. Lowth S. An assessment of “variation conscious” precision fixturing methodologies for the control of circularity within large multi-segment annular assemblies / S. Lowth, D.A. Axinte // Precision Engineering. – 2014. – Vol. 38. – P. 379-390.
18. Memon M. Minimizing Assembly Errors by Selecting Optimum Assembly Sequence in the Assembly of a Rigid Circular Structure / M. Memon, T. Hussain, Z.A.L.I. Memon // Mehran University Research Journal of Engineering & Technology. – 2012. – Vol. 31. – № 4. – P. 743-754.
19. Das A. Fixture Design Optimisation Considering Production Batch of Compliant Non-Ideal Sheet Metal Parts / A. Das, P. Franciosa, D. Ceglarek // Procedia Manufacturing. – 2015. – Vol. 1. – P. 157-168.
20. Aksenov V.V. Nastrojka polozhenija opor metodom trianguljacii pri sborke sekcij geohoda / V.V. Aksenov, A.V. Val'ter, S.E. Lagunov // Tehnologii i materialy. – 2015. – № 1. – S. 31-36.
21. GOST R 53442-2015 (ISO 1101:2012). Osnovnye normy vzaimozamenjaemosti. Harakteristiki izdelij geometricheskie. Ustanovlenie geometricheskikh dopuskov. Dopuski formy, orientacii, mestoraspolozhenija i bienija.
22. Gill F. Prakticheskaja optimizacija / F. Gill, U. Mjurrej, M. Rajt. – M.: Mir, 1985. – 509 s.
23. Cheng B.-W. Optimization of mechanical assembly tolerances by incorporating Taguchi's quality loss function / B.-W. Cheng, S. Maghsoodloo // Journal of Manufacturing Systems. – 1995. – Vol. 14. – № 4. – P. 264-276.

Поступило в редакцию 28.03.2017

Received 28 March 2017