

Методика повышения точности деталей ГТД, изготавливаемых селективным лазерным спеканием

И.С. Степаненко¹, В.А. Печенин¹, Н.В. Рузанов¹, А.И. Хаймович¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Среди сложнопрофильных деталей современных газотурбинных двигателей особое внимание в производстве уделяется лопаткам, т.к. именно к их поверхностям предъявляются наиболее жёсткие требования по геометрической точности пера. В настоящее время всё более широкое распространение получают аддитивные технологии, посредством которых можно получать такие детали сложной формы в короткие сроки с минимальной постобработкой. Однако, процесс селективного лазерного сплавления сопровождается постоянным перераспределением температурных напряжений в зоне сплавления и во всей изготавливаемой детали, что может привести к значительным поводкам геометрии. В работе предложена методика, позволяющая снизить возникающие в процессе печати погрешности. Методика основана на применении компьютерного моделирования процесса селективного лазерного процесса для прогнозирования поволодок и последующей корректировки входной триангуляционной модели путём перемещения узлов её поверхностей. По результатам апробации был произведён контроль и анализа полученной после выращивания геометрии детали партии и реализован дополнительный алгоритм компенсации погрешностей, возникающих вследствие нестабильности процесса.

1. Введение

Существенный недостаток технологий селективного лазерного сплавления (СЛС) – большие термические деформации, возникающие вследствие действия остаточных напряжений из-за значительного градиента температур: при кристаллизации верхний сплавленный слой испытывает растягивающие напряжения, нижние – сжимающие. Как следствие – большие поводки, особенно после отделения выращенной заготовки от платформы. Поэтому важной является задача обеспечения размерной точности деталей, изготовленных методом СЛС. В настоящее время в конструкторско-технологической подготовке производства активно используются цифровые модели и методы оптимизации. В процессе подготовки детали для аддитивного производства её поверхности преобразуются в триангуляционную сетку (формат STL), что также влияет как на шероховатость получаемой поверхности [1], так и на размерную точность. Существующие работы посвящены в основном снижению издержек производства путём топологической оптимизации всей конструкции, направления выращивания и расположения системы поддержек [2-4].

Предлагаемая методика направленной коррекции технологической 3D-модели (мастер-модели) заключается в расчёте унаследованных деформаций, возникающих от действия термических напряжений, с последующей корректировкой мастер-модели на величины

инвертированных деформаций. На основе скорректированной мастер-модели в итоге генерируется управляющая программа для выращивания.

Принцип компенсации действия остаточных напряжений путём введения предварительной коррекции геометрии детали по результатам конечно-элементного (КЭ) анализа заключается в следующем:

- производится симуляция процесса СЛС и постобработки, включая операции термообработки и отрезки;
- на основе теплового анализа при симуляции операций технологического процесса рассчитываются остаточные напряжения;
- от действия остаточных напряжений рассчитываются деформации и поводки (смещения) геометрии выращиваемой детали;
- эти смещения, привязанные к узлам STL-файла мастер-модели, далее суммируются с обратным знаком (инвертируются) с координатами узлов триангуляционной поверхности мастер-модели.

В результате получается скорректированная мастер-модель, которая должна компенсировать термические поводки при выращивании. Однако, этот подход требует разработки особой технологии для достижения требуемых параметров точности.

Разрабатываемая технология включает этапы:

- калибровка модельных свойств используемого сплавляемого материала на небольших тестовых образцах для последующего расчёта возникновения поволодок от действия остаточных напряжений при сплавлении в специализированной САЕ-системе;
- уточняющая калибровка САЕ-системы на небольшом образце, имитирующем условия выращивания натурной детали, с целью минимизации специально рассчитываемой для этого класса деталей функции погрешности свойств материала (выявление и устранение систематической погрешности определения свойств материала для конкретных условий выращивания);
- автоматизированный расчёт 3D-функции погрешностей САЕ-анализа при выполнении операций коррекции STL-файла мастер-модели в САЕ-системе путём сравнения результатов измерения выращенного образца и номинальной модели (выявление систематической погрешности моделирования и выполнения операции коррекции в САЕ-системе);
- автоматизированная корректировка STL-файла мастер-модели натурной детали по результатам расчёта в «калиброванной» ранее системе с последующим устранением погрешности КЭ-анализа дополнительным смещением узлов мастер-модели на основе рассчитанной ранее 3D функции погрешности.

2. Этапы разрабатываемой методики повышения точности

2.1. Уточняющая калибровка унаследованных деформаций

Целью уточняющей калибровки является устранение систематической погрешности свойств материала для данных условий лазерного синтеза. В качестве калибруемого параметра свойств материала выступают унаследованные деформации (*inherent strains*). Унаследованные деформации – это деформации, которые возникают в кристаллизованном сплавленном слое в результате воздействия на него растягивающих напряжений от ранее синтезированных слоев.

В каждом частном случае унаследованные деформации являются функциями не только свойств материала (металлопорошковой композиции), но во многом конкретных условий выращивания. Это объясняется спецификой теплонапряженного состояния, характерного для каждого отдельного случая. В этой связи калибровку системы КЭ-анализа необходимо проводить на специальном образце, имитирующем условия выращивания натурной детали. Для центробежного компрессора (ЦБК), синтезируемого из титанового порошка ВТ6, такой образец представляет собой сектор, включающий три смежные лопатки (рисунок 1).



Рисунок 1. Образец для калибровки, приближённый к условиям выращивания итогового изделия.

Поскольку в первую очередь нас интересуют области изделия, которые наибольшим образом подвержены влиянию унаследованных деформаций, то функция погрешности калибровки рассчитывается для наиболее тонких элементов (поверхностей лопаток ЦБК).

Важным требованием при определении действительных унаследованных деформаций является принцип неотрицательных значений погрешности после выращивания скорректированной модели, согласно которому погрешность должна откладываться в направлении наращивания припуска – т.е. сонаправленна с нормалью к выращиваемой поверхности

Автоматизированный расчёт 3D-функции погрешности конечно-элементного (КЭ) анализа при выполнении операций коррекции STL-файла мастер-модели.

Цель данного этапа заключается в минимизации систематической погрешности, вызванной несовершенством и отклонениями КЭ-расчёта термических поволодок при симуляции лазерного синтеза ЦБК в САЕ-системе.

Алгоритм предлагаемого метода заключается в том, что на второй итерации:

1) производится КЭ-анализ лазерного синтеза при действительных значениях унаследованных деформаций, определенных на предыдущем этапе;

2) осуществляется коррекция 3D мастер-модели (STL-файл) на величины расчётных инвертированных термических поволодок;

3) выращивается образец (сектор с тремя лопатками для ЦБК) по скорректированной мастер-модели;

4) производятся измерения его поверхностей и рассчитываются отклонения от номинальной модели. Вводится дополнительная коррекция 3D мастер-модели.

Первые 2 этапа алгоритма произведены в Simufact Additive (тестовая версия предоставлена MSC Software), выращивание детали произведено на 3D-принтере по металлу – установке селективного лазерного спекания SLM 280 HL; анализ измерений проводился в PC-DMIS (ПО для КИМ DEA Global Performance 07.10.07) и в специально разработанном в инженерной системе MATLAB расчётном модуле.

Новизной предлагаемой методики является применение авторских алгоритмов и моделей для дополнительной коррекции мастер-модели. Как отмечено выше, анализ и компенсация отклонений, полученных после проведения измерений производится в системе MATLAB.

2.2. Вычисление величин отклонений в MATLAB

В систему MATLAB загружаются координаты измеренных точек и параметры (вершины, грани) STL-файла мастер-модели, по которой производилось выращивание методом ЛС.

Производится вычисление расстояний от точек до мастер-модели (отклонений при выращивании).

2.3. Расчёт функции погрешности САЕ-системы

По результатам расчёта отклонений от номинальной модели для предварительно скорректированной мастер-модели после КЭ-симуляции процесса ее лазерного синтеза и расчёта поводок от действия термических напряжений, производится расчёт функции погрешности симуляции в САЕ-системе. В данном случае для ЦБК удобно задать функцию погрешности в псевдоцилиндрической системе координат (полярный радиус ρ , полярный угол α , координата z – фиксирована для каждого сечения).

Основные требования к функции погрешности:

- функция погрешности должна быть выпуклой в силу рассмотренного принципа неотрицательных значений погрешностей (4), получаемых при определении действительных унаследованных деформаций (см. предыдущий раздел);
- функция погрешности должна качественно соответствовать физике процесса выращивания для каждого конкретного случая, т.е. возрастать с ростом ρ и z применительно к лопаткам ЦБК.

Для определения погрешности моделирования была принята функция второго порядка со смешанными эффектами от влияния ρ и z :

$$\Delta = (a_0 + a_1 \bar{\rho})(1 + b_1 \bar{z}), \tag{1}$$

где $\bar{\rho} = \frac{\rho - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}}$ - относительный радиус узла STL-файла мастер модели, $\bar{z} = \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}}$ -

относительная координата z . $\rho = \left((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right)^{1/2}$ - радиус-вектор узла в проекции на плоскость $z = const$, x_0, y_0 - координаты начала системы координат.

Без приведения доказательства считаем, что в силу выпуклости функции погрешности результирующая погрешность при смещении узлов STL-файла при проведении коррекции раскладывается по координатам следующим образом:

$$\Delta_i = \Delta \cdot n_i, n_i = \Delta \cdot \frac{\Delta_i'}{\sqrt{(\Delta_x')^2 + (\Delta_y')^2 + (\Delta_z')^2}}, i = x, y, z, \tag{2}$$

где n - вектор направляющих косинусов нормали к поверхности погрешности

Учитывая (1), значения частных производных от Δ для расчёта смещения узлов STL-файла при дополнительной коррекции запишется в виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta_x' &= - \frac{a_1 \left(1 + b_1 \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \right)}{\left((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right)^{1/2}} (x - x_0) (\rho_{\max} - \rho_{\min}) \\ \Delta_y' &= - \frac{a_1 \left(1 + b_1 \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \right)}{\left((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right)^{1/2}} (y - y_0) (\rho_{\max} - \rho_{\min}) \\ \Delta_z' &= \left(a_0 + a_1 \frac{\left((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right)^{1/2} - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \right) \end{aligned} \right. \tag{3}$$

2.4. Алгоритм классификации фасет триангуляционной поверхности

Для компенсации погрешностей FE-анализа лазерного синтеза необходимо выделить фасеты, принадлежащие только поверхностям спинки и корыта, и для которых определена функция погрешности [5]. Опишем кратко этапы разработанного для частного случая алгоритма для классификации (фильтрации) фасет.

Входными параметрами алгоритма являются: $V_{g \times 3}$ (матрица координат вершин сетки STL-модели); $F_{m \times 3}$ (матрица сочетаний вершин по три, образующих фасеты поверхностей); $N_{m \times 3}$ (матрица координат нормалей фасет), \vec{p} (вектор координат точки на поверхности, фасеты которой необходимо выделить), \vec{i} (нормаль в точке p), α (допуск на угол для поиска соответствующих фасет).

Производится поиск фасеты, которой принадлежит точка p (точка пересечения луча и фасеты).

Производится поиск всех фасет, у которых вектор нормали отличается от вектора нормали \vec{i} не более чем на величину α (для проверки углов используется скалярное произведение нормальных векторов).

Из всех найденных фасет, подходящих по направлению нормали, выбираются связанные с первой и между собой общими вершинами.

2.5. Фильтрация границ функции коррекции

Для удовлетворения условиям сохранения целостности при смещении узлов получаемой скорректированной модели, функция 3D-коррекции принимает вид:

$$\Delta_i = \Delta_i \cdot t, \quad i = x, y, z \tag{4}$$

где t - оконный фильтр для m корректируемых узлов с координатами $q_m = (x_m, y_m, z_m)$:

$$t_m = \begin{cases} p_m = [0 \dots 1], \bar{q}_m \in [0, a_l] \cup [a_r, 1] \\ 1, \bar{q}_m \in [a_l, a_r] \end{cases}, \tag{5}$$

где $\bar{q}_m = \frac{q_m - q_{min}}{q_{max} - q_{min}}$ - относительные координаты смещаемых узлов

В качестве функции фильтра p_m применена функция Гаусса

$$p_m = e^{-n(\bar{q}_m - a_b)^2}; a_b = a_l, a_r; n \gg 1 \tag{6}$$

Рассмотрим результаты применения этапов методики для рассматриваемого образца.

3. Результаты

Проводилась оценка полученных в результате выращивания отклонений. Стандартное программное обеспечение КИМ позволяет визуализировать картину отклонений по отдельным сечениям. На рисунке 2 приведены результаты измерений геометрии в первом и третьем сечении средней лопадки.

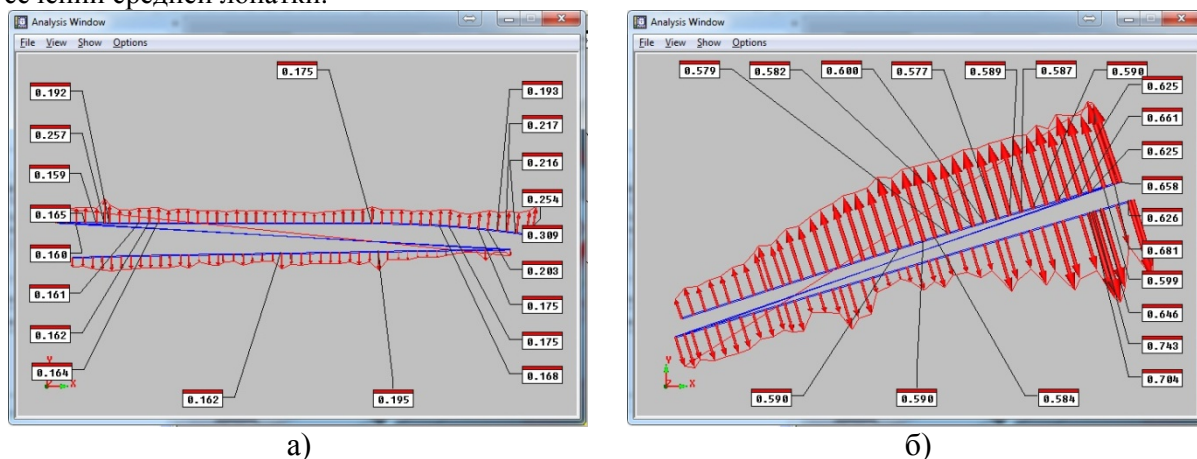


Рисунок 2. Визуализация результатов измерений для а) 1 сечения б) 3 сечения лопадки.

Расчётные модели функции погрешности представлены на рисунке - для поверхности спинки пера ЦБК (степень достоверности модели 77%) и на рисунке, для поверхности корыта - на рисунке 3 (степень достоверности модели 69%). Статистические показатели расчёта коэффициентов модели погрешности (5) соответственно для спинки и корыта представлены в таблице 1.

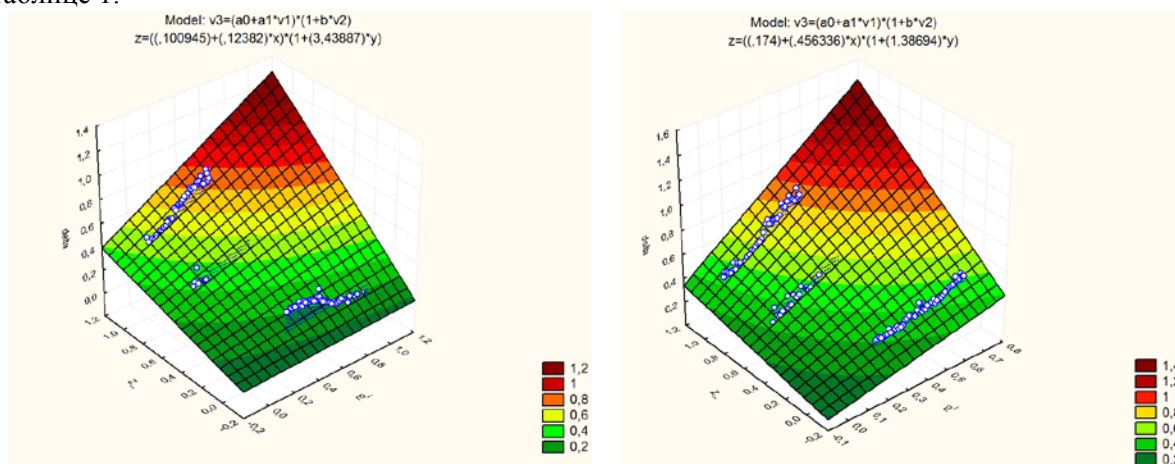


Рисунок 3. Функция погрешности для корректировки STL-файла в области спинки лопаток ЦБК.

Результаты измерения геометрических отклонений изготовленной опытной детали показывают, что масштабная коррекция всех точек STL-модели на постоянный коэффициент, обратный прогнозируемым деформациям недостаточно снижает получаемые отклонения. Поэтому необходимо скорректировать перемещения узлов входной триангуляционной сетки на величину систематической погрешности, путём сравнения наблюдаемых смещений прогнозированных и измеренных координат узлов сетки.

Таблица 1. Статистические показатели расчёта коэффициентов модели погрешности для спинки и корыта.

	Наиболее вероятная величина	СКО	Критерий Стьюдента	P-значение	Нижняя граница	Верхняя граница
a_{0c}	0,100945	0,014468	6,976944	0,00	0,072313	0,129578
a_{1c}	0,123820	0,020387	6,073549	0,00	0,083475	0,164165
b_c	3,438871	0,482276	7,130508	0,00	2,484461	4,393280
a_{0k}	0,174000	0,012432	13,99653	0,00	0,149390	0,198610
a_{1k}	0,456336	0,027046	16,87278	0,00	0,402796	0,509876
b_k	1,386937	0,100848	13,75279	0,00	1,187299	1,586575

При устранении погрешностей, связанных со смещением узлов STL- файла мастер-модели по зависимостям (1)-(3) требуется придерживаться принципа селективности выбора узлов. Поскольку функция погрешности (3) рассчитывалась для лопатки ЦБК (отдельно для спинки и корыта), то при коррекции координат узлов следует:

- смещать только те узлы, для которых определена своя функция расчёта погрешности.
- для стыковки скорректированных областей STL-модели с остальными областями должны быть определены небольшие переходные области коррекции, в которых смещения узлов плавно изменяются от нуля – на границах стыковки до величины t на небольшом отступе от границы.

Результаты применения фильтрация границ функции коррекции.

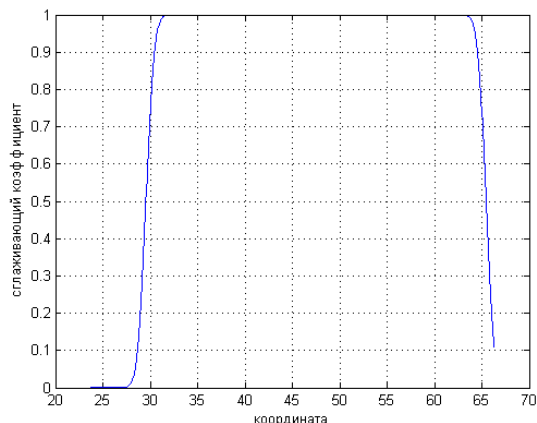


Рисунок 4. Функция фильтрации величин смещения узлов по границе области коррекции и результат применения этой функции.

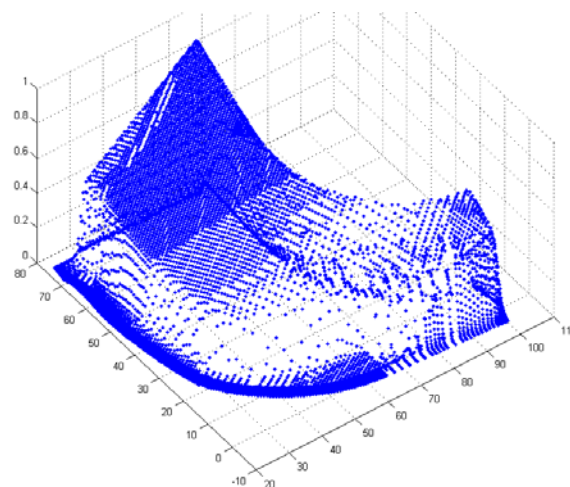


Рисунок 5. Результат применения функции фильтрации на одной из классифицированных поверхностей.

4. Выводы

В результате проведенных исследований была разработана и апробирована технология, включающая алгоритмы и методики, а также адаптируемое лицензионное и собственное программное обеспечение для достижения размерной точности при выращивании деталей методом лазерного синтеза металлопорошковых композиций.

Размерная точность деталей сложной геометрии типа лопатка, блиск достигается за счёт использования направленной коррекции исходной 3D мастер-модели в формате STL, используемой для синтеза. Коррекция направлена на снижение поволодок вызываемых большими термическими деформациями при ЛС. На основе скорректированной мастер-модели в итоге генерируется управляющая программа для СЛС-принтера.

Предварительная коррекция геометрии модели производится на основе конечно-элементного анализа после калибровки расчётного CAE-модуля с помощью специальных выращиваемых образцов. Окончательная коррекция производится автоматизировано путем выборочного смещения узлов фасетов предварительно скорректированной мастер-модели в формате STL по специальному алгоритму. Разработанная методика и алгоритмы позволяют минимизировать систематическую погрешность, возникающую при расчетах поволодок. Систематическая погрешность включает в себя следующие компоненты: 1) погрешность определения унаследованных деформации, зависящих от свойств материала и конкретных условий выращивания, 2) погрешность в алгоритмах расчетов (погрешность конечно-элементного анализа).

В то же время при выращивании пробных заготовок в виде секторов центробежного компрессора было выявлено значительные величины случайной погрешности, которая составляет значительную часть общей погрешности (до 40%). В дальнейшем можно говорить о том, что для снижения случайной составляющей погрешности требуется соблюдение строго унифицированных условий технологического процесса изготовления деталей.

5. Благодарности

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации программы повышения конкурентоспособности Самарского университета среди мировых ведущих научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.

6. Литература

- [1] Strano, G. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting / G. Strano, L. Hao, R.M. Everson, K.E. Evans // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213(4). – P. 589-597.
- [2] Barclift, M. CAD-Integrated Cost Estimation and Build Orientation Optimization to Support Design for Metal Additive Manufacturing / M. Barclift, A. Armstrong, T.W. Simpson, S.B. Joshi // *ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. – American Society of Mechanical Engineers, 2017. – P. V02AT03A035-V02AT03A035.
- [3] Dai, K. Distortion minimization of laser-processed components through control of laser scanning patterns / K. Dai, L. Shaw // *Rapid Prototyping Journal*. – 2002. – Vol. 8(5). – P. 270-276.
- [4] Zegard, T. Bridging topology optimization and additive manufacturing / T. Zegard, G.H. Paulino // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2016. – Vol. 53(1). – P. 175-192.
- [5] Besl, P.J. A method for registration of 3-D shapes / P.J. Besl, N.D. McKay // *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. – 1992. – Vol. 14(2). – P. 239-256.

Technique of increasing the accuracy of GTE parts manufactured by selective laser sintering

I.S Stepanenko¹, V.A. Pechenin¹, N.V. Ruzanov¹, A.I. Khaimovich¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. Among the complex profile components of modern gas turbine engines, special attention is paid to the impellers and its blades, and their surfaces have most stringent requirements for geometric precision. At the present time, additive technologies are becoming increasingly widespread, through which it is possible to obtain such complex shape parts in a short time with minimal post-processing. However, the process of selective laser melting (SLM) is accompanied by a constantly changing redistribution of temperature stresses in the fusion zone and in the entire manufacturing part, which can lead to significant deflections of geometry. In this paper, we propose a technique that allows us to reduce the errors that arise during the building process. The technique is based on the use of computer simulation of the selective laser process for predicting deflections and subsequent pre-correction of the input triangulation model by moving the nodes of its surfaces. Based on the results of the approbation, control and analysis of the batch parts obtained by SLM, an additional algorithm for compensating for errors that exist due to an instability of the process was implemented with MATLAB.

Keywords: selective laser melting, complex shape parts, impeller, thermal stresses, triangulation surface, compensation algorithm, MATLAB.