

ОПТИМИЗАЦИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ОЦЕНКИ МНОЖЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

© 2018 А.И. Хаймович, В.И. Санчугов, И.С. Степаненко, В.Г. Смелов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 06.12.2018

В исследовании описывается адаптация метода Тагути в численных и натуральных экспериментах по изготовлению сектора камеры сгорания методом селективного лазерного сплавления с минимальными температурными деформациями. Ставилась задача получения качественной детали при минимальном количестве численных экспериментов. Для исследования был и выбраны следующие параметры оптимизации (независимые факторы): мощность излучения, скорость штриховки (сканирования), два фактора компенсации влияния действия остаточных температурных напряжений – масштабный коэффициент предварительной коррекции геометрии детали и количество дополнительных технологических элементов жесткости. Использовался ортогональный план из 9 экспериментов L9 (4×3) с варьированием факторов на трех уровнях. В качестве параметров качества были выбраны величины короблений по 9 зонам камеры сгорания и предел прочности материала камеры. Поскольку параметры качества носят разнонаправленный характер, то для решения оптимизационной задачи при множественных параметрах качества был использован серый реляционный анализ. По полученным параметрам были выращены сегменты камеры сгорания газотурбинного двигателя. *Ключевые слова:* SLM, камера сгорания, коробление, ANOVA, метод Тагути, серый реляционный анализ, множественные параметры качества.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время всё большее распространение в аэрокосмической промышленности получают методы аддитивного производства. Селективное лазерное сплавление (selective laser melting, SLM) позволяет изготавливать детали сложной формы, однако в процессе селективного лазерного сплавления температура меняется, происходит изменение распределения температурных нагрузок, что и влечёт за собой появление остаточных напряжений [1]. Кроме того, в результате этого изменения температуры во времени образуется анизотропная микроструктура. Итоговые свойства материала (например, усталостная прочность и прочность на растяжение) напрямую связаны с микроструктурными особенностями детали, и поэтому наличие остаточных напряжений имеет неблагоприятный характер и приводит к пластическим деформациям сплавляемых деталей [1,2]. Моделирование термомеханических процессов в технологических системах с интенсивной деформацией

Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей. E-mail: berill_samara@bk.ru
Санчугов Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок
Степаненко Илья Сергеевич, аспирант.
E-mail: iliya.stepanenko@gmail.com
Смелов Виталий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей. E-mail: pdla_smelov@mail.ru

описано в работах [4-6]. Влияние направления сплавления на величины остаточных напряжений исследовано в работе [3]. В результате действия остаточных напряжений от термических нагрузок при лазерном синтезе тонкостенных деталей возникают существенные деформации, которые приводят к браку. В этой связи актуальной задачей является разработка методов компенсации действия остаточных напряжений.

Методы компенсации можно условно разделить на 4 группы:

- оптимизация и коррекция режимных параметров процесса сплавления, включающие мощность излучения, скорость движения лазерного луча, размеры пятна луча, направление и стратегию сканирования;
- оптимизация теплоотвода в технологическую платформу через подложку;
- топологическая оптимизация конструкции добавлением удаляемых технологических элементов типа поддержка, балка, для увеличения жесткости и препятствию короблению от действия термических напряжений;
- компенсация действия остаточных напряжений путем введения предварительной коррекции геометрии детали.

Применение первого метода осложняется тем, что не всегда быстро удаётся подобрать режим выращивания, т.к. следует учитывать не только свойства исходного материала, но и особенности геометрии конкретной детали. Второй метод осуществляется подбором количества, геометрией сечения и расположением

теплоотводящих стержней. Последние два метода особенно эффективны при выращивании тонкостенных деталей, где обеспечение жёсткости наиболее важно. Предварительная коррекция может осуществляться путём первоначальной оценки результирующих деформаций и соответствующего изменения геометрии заготовки путем инвертирования величин коробления, умноженных на масштаб коррекции геометрии.

МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ

Выращивание сегментов камеры сгорания из никель-хромовой металлопорошковой композиции производилось на установке селективного лазерного сплавления SLM 280HL. В общих чертах технология выбора рациональных режимов лазерного сплавления металлопорошковых композиций изложена в работе [7].

Измерения проводились на координатно-измерительной машине DEA GLOBAL Performance. Численное моделирование процесса SLM производилось с использованием программного обеспечения Simufact Additive©.

Для выращивания использовался металлический порошок с размером фракции 40 мкм марки BB751П, химический состав которого приведен в табл. 1.

Подробно опыт получения деталей методом SLM из металлопорошковой композиции BB751П приведен в работах [8].

Для исследования был и выбраны следующие параметры оптимизации (независимые факторы): P – мощность излучения, v – скорость штриховки (сканирования) и два фактора компенсации влияния действия остаточных температурных напряжений M – масштабный коэффициент предварительной коррекции геометрии детали и t – индикатор введение дополнительных технологических элементов жесткости ($t = 0$ – элементы жесткости отсутствуют, $t = 1$ – введены продольные элементы жесткости, $t = 2$ – введены продольные и поперечные элементы жесткости). В качестве зависимых факторов (параметров качества) были выбраны величины максимальных и средних деформаций от действия остаточных напряжений в 9 областях поверхности сегмента камеры сгорания, а также значения предела прочности для условий сплавления, соответствующих проводимым экспериментам. Значения короблений для различных сопоставляемых условий сплавления

были получены численными методами по верифицированной экспериментально модели.

Для определения предела прочности σ в зависимости от режимных параметров лазерного сплавления использовалась регрессионная модель второго порядка (1).

$$\bar{\sigma} = 0,25 + 1,0627\bar{v} + 0,1532\bar{p} + 1,5324\frac{\bar{p}}{\bar{v}} - 1,3121\bar{v}^2 - 1,294\left(\frac{\bar{p}}{\bar{v}}\right)^2, \quad (1)$$

где нормированные величины имеют вид:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma - 891}{241}, \bar{v} = \frac{v - 710}{100}, \bar{p} = \frac{P - 225}{100}.$$

Поскольку предполагалось, что основные результаты экспериментов будут получены численными методами, то для верификации численной модели процесса SLM и оценки погрешности расчета был проведен натурный эксперимент по выращиванию сегмента камеры сгорания. Выяснилось, что расчетные и измеренные величины короблений обладают хорошей корреляцией, поэтому для оценки величин короблений в зависимости от режимов сплавления расчетные величины коробления далее были использованы как параметры качества процесса.

МЕТОД ТАГУЧИ

Ключевым принципом измерения качества по Тагучи является минимизация изменчивости (вариативности) в технологическом процессе производства продукта в ответ на шумовые факторы и максимизация изменчивости в ответ на управляющие факторы. Факторами шума N являются те, которые не находятся под контролем технологического процесса, либо не входят в область определения задачи оптимизации. Факторы сигнала S – это те факторы, которые устанавливаются или контролируются технологическим процессом для конкретной задачи оптимизации. Цель усилий по повышению качества может быть заявлена как попытка максимизировать отношение сигнала к шуму (S/N) для соответствующего продукта. В тех случаях, когда ставится задача «меньше – лучше», т.е. свести к минимуму появление некоторых нежелательных характеристик продукта, в нашем случае – деформаций, вызванных остаточными напряжениями, должны быть вычислены следующее соотношение S/N Тагучи:

$$\xi = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}, \quad (2)$$

где y_i – наблюдаемые значения окликов в эксперименте, n – количество экспериментов.

Таблица 1. Химический состав металлопорошковой композиции BB751П

Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ce	Mo	W	V	Co	Nb	Ti	Al	B	Pb	Mg	La
до 1	0.04 – 0.08	до 0.3	до 0.3	50.09 – 50.86	до 0.009	до 0.015	10 - 12	до 0.01	4 - 5	2.5 - 3.5	0.4 - 0.8	14 - 16	3 - 3.5	2.5 - 3.1	3.7 - 4.2	до 0.015	до 0.07	до 0.01	до 0.02

Для исследования была выбрана ортогональная матрица L9 (4×3) в соответствии с методом Тагучи [9], которая представляла собой 9 наборов экспериментов и содержит 4 трехуровневых фактора. Ортогональный план эксперимента и расчетные значения параметров качества приведены в таблице 2.

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ
ГЛАВНЫХ ЭФФЕКТОВ**

Для анализа использовалась зависимость:

$$\Delta F = \max(\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_n) - \min(\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_n), \quad \bar{F}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ij}, \quad (3)$$

где \bar{F}_i – средний уровень S/N для i-го уровня фактора F, m – число i-го уровня каждого фактора, y_{ij} – величина S/N для i-го фактора j-того уровня, ΔF – значение основных эффектов фактора F, а n – количество уровней каждого фактора. Чем выше значение основного эффекта фактора, тем больше влияние этого фактора на систему в сравнении с другими факторами.

В соответствии со значением основных эффектов факторов, а именно $\Delta F = 1,62375$ – для мощности лазерного излучения (P), $\Delta F = 0,43756$ – для скорости штриховки (V), $\Delta F = 7,78723$ – для фактора масштаба коррекции геометрии (M) и $\Delta F = 5,08169$ – для дополнительных элементов жесткости (t) в порядке степени влияния уровня факторов на характе-

ристику качества, факторы можно ранжировать следующим образом: 1 – M, 2 – t, 3 – p, 4 – v

ВАРИАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ (ANOVA)

ANOVA помогает выявить влияние отдельных факторов на величины коробления как характеристики качества. В таблице 3 представлены результаты ANOVA. Фактор масштаба коррекции геометрии исключен ввиду его низкой достоверности в соответствии со значениями параметров F и p по результату предварительного анализа. Чем меньше значение F и больше значение p, тем более адекватна оценка влияния факторов, оцениваемая по величине дисперсии SS. По значениям SS факторы ранжируются в порядке убывания влияния:

$$1 - t, 2 - P, 3 - v.$$

Фактор масштаба коррекции геометрии M в виду его низкой достоверности по критерию F в анализе не участвовал.

Использование F-теста компенсирует такие дефекты метода Тагучи, как невозможность идентифицировать эффекты, которые могут иметь различные эксперименты в отношении характеристик качества, или оценить уровень экспериментальных ошибок.

На рисунке 1 приведены графики функции ETA соотношения сигнал/шум параметров качества в ортогональном эксперименте L9 по Тагучи.

Таблица 2. Значения параметров качества

№	P, Вт	V, мм\сек	M	t	Максимальная величина короблений по 9 областям сегмента камеры сгорания, мм									σ, МПа	
					Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5	Зона 6	Зона 7	Зона 8	Зона 9		
1	290	700	-0,80	0	3	2,80	1,80	2,80	1,80	1,80	1,80	4,00	1,8	1,8	1020
2	290	760	-1,00	1	0,317	0,81	1,07	0,51	0,39	0,39	0,39	0,34	0,57	0,65	1120
3	360	760	-0,80	2	1,2	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2	1,4	1053
4	325	700	-1,00	2	0,4	0,60	0,80	0,30	0,30	0,30	0,30	0,60	0,6	0,6	966
5	360	800	-1,00	0	1	1,37	1,42	0,86	0,54	0,54	0,54	1,41	1,08	0,9	1025
6	360	700	-1,20	1	0,64	1,13	1,44	0,78	0,59	0,59	0,54	1,024	0,88	0,88	864
7	325	760	-1,20	0	1,2	1,39	1,44	0,97	0,67	0,67	0,67	1,67	0,32	0,99	1107
8	290	800	-1,20	2	0,68	0,87	1,17	0,58	0,44	0,48	0,46	0,704	0,605	0,605	1046
9	325	800	-0,80	1	1,6	1,00	1,60	1,60	1,20	1,60	1,60	1,00	1,6	1,2	1054

Таблица 3. Результаты ANOVA с исключением влияния корректирующего масштабного коэффициента

	SS	df	MS	F	p
{1} Мощность	4.42766	2	2.21383	0.046462	0.955601
{2} Скорость	0.35226	2	0.17613	0.003697	0.996317
{4} Жесткость	40.09485	2	20.04742	0.420740	0.703858
Остаток	95.29594	2	47.64797		

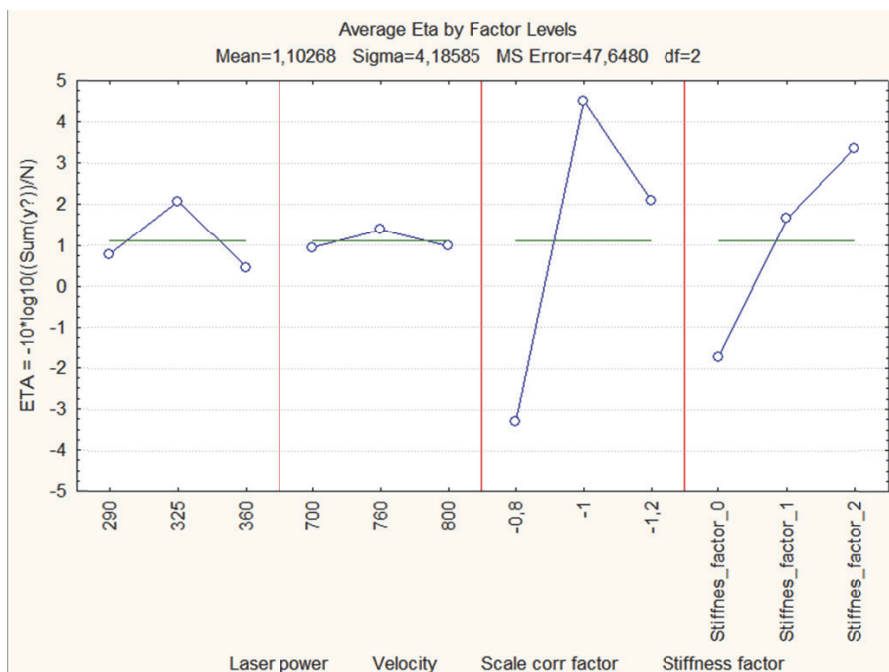


Рис. 1. График средних значений ETA в зависимости от уровней управляющих факторов

Из графика отклика (рисунок 1) осредненного параметра качества ETA следует, что наиболее благоприятные режимные параметры SLM сегмента камеры сгорания соответствуют значениям параметров мощность лазера – 325 Вт, скорость штриховки – 760 мм/мин, величине фактора масштаба коррекции геометрии – 1 и введению дополнительных элементов жесткости соответствующим 2 уровню, т.е. максимальному.

СЕРЫЙ РЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Очевидно, что средние и максимальные значения короблений по 9 областям должны быть минимальны, величина предела прочности – максимальной. Поскольку в этом случае анализ «меньше – лучше» по Тагучи для обозначенных характеристик качества неприменим в силу их разнонаправленности, то был использован серый реляционный анализ – это метод измерения в теории серой системы, который анализирует степень и уровень отношения разнородных параметров для их дискретной последовательности.

Исходные экспериментальные данные сначала нормировались в диапазоне от 0 до 1 в соответствии с принципом «меньше – лучше» для величины коробления по зависимости

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}, \quad (4)$$

$y_{ij} = \max_n y_{ij}^n$ – наиболее негативная характеристика качества (величина коробления) среди $n = 1 \dots 9$ рассматриваемых областей выращенной камеры сгорания. Наилучший нормированный результат соответствует значению 1.

Для предела прочности, для которого подходит характеристика «больше – лучше», нормирование проводилось по зависимости

$$x_{ij} = \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}, \quad (5)$$

где y_{ij} – величина предела прочности для j эксперимента, рассчитываемая по зависимости (1).

Серый реляционный коэффициент ξ_{ij} , который рассчитывается, для определения соотношения между идеальным и фактическим экспериментальными результатами может быть выражен как:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}, \quad (6)$$

где x_i^0 – это идеальный результат (т.е. лучший нормализованный результат =1) для i – характеристики качества, $\zeta = [0,1]$ – коэффициент отличия, целью которого является ослабление эффекта $\max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|$, когда он становится слишком большим и, следовательно, увеличивает разницу значимости серого реляционного коэффициента. В общем, его значение принимается равным 0,5, если все параметры процесса имеют равный вес [9].

В таблице 4 представлены реляционные коэффициенты для каждого эксперимента ортогональной матрицы L9. После получения коэффициентов ξ_{ij} далее используется метод весовых коэффициентов для интеграции полученных значений коэффициентов для каждого эксперимента в интегрированную реляционную оценку. Общая оценка множественных характеристик качества основана на интегрированной реляционной оцен-

Таблица 4. Результаты реляционного анализа

	y_1	y_2	y_3	x_1	x_2	x_3	ξ_1	ξ_2	ξ_3	γ
1	2,20	4	1020	0	0	0,6078	0,3333	0,3333	0,5604	0,44685
2	0,84	1,067	1120	0,7533	0,9166	1	0,6696	0,857	1	0,90039
...										
8	0,95	1,17	1046	0,6972	0,8844	0,7098	0,6228	0,8122	0,6328	0,69409
9	1,20	1,6	1054	0,5556	0,75	0,7412	0,5294	0,6667	0,6589	0,642205

ке, которая определяется по зависимости:

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{\sum_{i=1}^m l_i} \xi_{ij}, \quad (7)$$

где l_i – уровень значимости i -ой характеристики качества.

Результирующие интегрированные реляционные оценки также приведены в таблице 4. Чем выше интегрированная реляционная оценка, тем лучше результат эксперимента, тем он ближе к идеально нормированному значению.

Влияние каждого параметра селективного лазерного сплавления на интегрированную реляционную оценку на разных уровнях параметра учитывается отдельно, поскольку план экспериментов ортогонален.

В табл. 4 U_1, U_2 – максимальные для каждого эксперимента величины соответственно среднего и максимального коробления, взятые по 9 областям, y_3 – величины предела прочности, x_1, x_2, x_3 – нормированные по зависимостям (4) и (5) факторы.

Значения реляционных оценок ξ_i рассчитывались по зависимости (6) относительно вектора желательных нормированных параметров качества $x_i^0 = (1, 1, 1)$, который соответствует максимальным полученным во всех численных экспериментах параметрам качества. Интегральная реляционная оценка γ определялась по формуле (7), при этом для максимального значения средней величины короблений в 9 областях (x_{1j}) было принято $l_1 = 30\%$, для наибольшего значения величины коробления в 9 областях (x_{2j}) – $l_2 = 70\%$, для предела прочности (x_{3j}) – $l_3 = 100\%$.

По рассчитанным значениям γ видно, что максимальное значение интегральной реляционной оценки (0,90039) имеет второй эксперимент, таблица 4. Эти значения факторов наилучшим образом соответствуют вектору желательности параметров качества. По совокупности результатов двух анализов, а также в соответствии со степенью влияния величин факторов на характеристики качества для выращивания сегмента камеры сгорания были приняты следующие режимы: мощность лазерного излучения – 290 Вт, скорость штриховки – 760 мм/мин, фактор масштаба коррекции геоме-

трии – 0,8, дополнительные элементы жесткости – 2 (максимальный уровень). Сегмент выращенной камеры сгорания представлен на рисунке 2



Рис. 2. Выращенный сегмент камеры сгорания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование сфокусировано на оценке процесса селективного лазерного сплавления тонкостенных маложестких деталей, склонных к термическим поводкам. Для исследования использовался метод оценки качества по Тагучи и ортогональный план экспериментов, состоящий из 9 экспериментов. Метод Тагучи применялся для оптимизации таких технологических факторов, как мощность излучения, скорость штриховки, фактор масштаба коррекции геометрии, введение дополнительных элементов жесткости. По результатам анализа экспериментов были выявлены оптимальные значения режимов лазерного сплавления сегмента камеры сгорания газотурбинного двигателя из жаропрочного никель-хромового порошка. Указанные технологические факторы были ранжированы согласно степени их влияния на параметры качества. Необходимо отметить, что метод Тагучи применим только для однородных характеристик качества, таких как величины коробления от действия остаточных напряжений при выращивании и не дает согласованного решения для случая, когда необходимо использовать множественные характеристики качества, такие как величины короблений и механические свойства. Для этого случая был использован серый реляционный анализ. Результаты применения этого метода на том же

плане экспериментов, что и метод Тагучи были отличны от последнего, поскольку дополнительно учитывались механические свойства, а именно предел прочности. Степень согласованности множественных характеристик качества учитывались исходя из принятого вектора желательности и коэффициентов влияния и уровня принятых уровней значимости факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu F. et al. Microstructure and residual stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy // Optics & laser technology. 2011. Т. 43. № 1. С. 208-213.
2. Shamsaei N. et al. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control // Additive Manufacturing. 2015. Т. 8. С. 12-35.
3. Alexeev V. P., Balyakin A. V., Khaimovich A.I. Influence of the direction of selective laser sintering on machinability of parts from 316L steel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. Т. 177. № 1. С. 012120.
4. Михеев В.А., Хаймович А.И. Математическое моделирование процессов динамической рекристаллизации поликристаллических материалов в условиях интенсивной пластической деформации // Кузнечно-штамповочное производство // Обработка материалов давлением, 2011. № 7. С. 37-42.
5. Шитарев, И.Л., Хаймович, А.И. Моделирование микроструктуры при высокоскоростной штамповке компрессорных лопаток из титанового сплава // Заготовительные производства в машиностроении, 2011. № 11. С. 41-44
6. Хаймович А.И. Уравнения состояния пластически деформируемой поликристаллической среды // Современные проблемы науки и образования, 2013. № 5. С. 69.
7. Смелов В.Г., Сотов А.В., Агаповичев А.В. Исследование структуры и механических свойств изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления из порошка стали 316L // Черные металлы, 2016. № 9 (1017). С. 61-65.
8. Балякин А.В., Смелов В.Г., Чемпинский Л.А. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета), 2012. № 3.2 (34). С. 47-52.
9. Acherjee B. et al. Application of grey-based Taguchi method for simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser transmission welding process of thermoplastics // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Т. 56. № 9-12. С. 995-1006.

OPTIMIZATION OF SELECTIVE LASER MELTING BY EVALUATION METHOD OF MULTIPLE QUALITY CHARACTERISTICS

© 2018 A.I. Khaimovich, V.I. Sanchugov, I.S. Stepanenko, V.G. Smelov

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev

Article describes the adoption of the Taguchi method in selective laser melting process of sector of combustion chamber by numerical and natural experiments for achieving minimum temperature deformation. The aim was to produce a quality part with minimum amount of numeric experiments. For the study, the following optimization parameters (independent factors) were chosen: the laser beam power and velocity; two factors for compensating the effect of the residual thermal stresses: the scale factor of the preliminary correction of the part geometry and the number of additional reinforcing elements. We used an orthogonal plan of 9 experiments with a factor variation at three levels (L9). As quality criterias, the values of distortions for 9 zones of the combustion chamber and the maximum strength of the material of the chamber were chosen. Since the quality parameters are multidirectional, a grey relational analysis was used to solve the optimization problem for multiple quality parameters. As a result, according to the parameters obtained, the combustion chamber segments of the gas turbine engine were manufactured

Keywords: selective laser melting, combustion chamber, distortion, ANOVA, Taguchi method, grey relational analysis, multiple quality characteristics.

Aleksandr Khaymovich, Doctor of Technics, Associate Professor at the Department of Engine Production Technology.
E-mail: berill_samara@bk.ru

Valerii Sanchugov, Doctor of Technics, Professor at the Department of Power Plant Automatic Systems.

Ilya Stepanenko, Postgraduate Student.

E-mail: iliya.stepanenko@gmail.com

Vitaliy Smelov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Department of Engine Production Technology.

E-mail: pdla_smelov@mail.ru