

Ультраструйная экспресс-диагностика анизотропии поверхностного слоя материалов и изделий ракетно-космической техники

© А.А. Барзов¹, А.Л. Галиновский¹, Е.С. Голубев¹, Н.Н. Сысоев²,
А.А. Федянин², А.С. Филимонов¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия

Проблема экспресс-диагностики разброса параметров, определяющих качество поверхностного слоя деталей, которые получены селективным лазерным сплавлением, является одним из факторов, ограничивающих масштабное применение этой технологии в современном машиностроительном производстве изделий ответственного назначения. В статье показана возможность решения этой проблемы путем применения технологии ультраструйной гидрофизической диагностики. Эта технология основана на анализе результатов, полученных при эрозионном локальном разрушении исследуемой поверхности материала детали или образца сверхскоростной гидроструей. Приведены примеры, иллюстрирующие высокий информационно-технологический потенциал технологии ультраструйной гидрофизической диагностики. Показано, что с помощью ультраструйного диагностирования в значительной мере обеспечивается получение информации, необходимой для того, чтобы повысить качество реализации всех этапов жизненного цикла изделий, в производстве которых перспективно использование аддитивных технологий. На примере узлового элемента каркаса рефлектора космического телескопа «Миллиметрон» показано, что предложенные авторами подходы могут быть использованы в процессе технологической подготовки производства изделий ракетно-космической техники.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, ультраструйная диагностика, анизотропия свойств материалов, физико-механические свойства

Введение. Современное аддитивное производство изделий ракетно-космической техники (РКТ) позволяет изготавливать пригодные для эксплуатации или требующие незначительной доработки детали. Фирмы, которые являются ведущими участниками этого рынка, в своей деятельности руководствуются тем, что аддитивные технологии могут быть внедрены в различных отраслях техники. В настоящее время компании, занимающиеся производством только оборудования для 3D-печати, как правило, реализуют и полный цикл аддитивного изготовления деталей для аэрокосмической промышленности. При этом определяются характеристики используемых материалов, осуществляются технологические процессы доводки деталей, включая термическую обработку, горячее изостатическое прессование, механическую обработку на станках с ЧПУ, а также контроль качества с использованием современных диагностических средств. Эти экономически

емкие высокотехнологичные наработки передаются на соответствующие предприятия, в первую очередь оборонно-промышленного профиля.

В трудах академика РАН Н.П. Алешина, в работах сотрудников ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» и других авторов [1–4] показана необходимость адекватного информационно-диагностического обеспечения качества изделий из материалов, полученных аддитивными технологиями, в частности методом селективного лазерного сплавления (СЛС), с помощью методов неразрушающего контроля. Однако вопрос об оперативном определении геометрической микромасштабной нестабильности физико-механических свойств (ФМС) этих материалов остается открытым. Проблема экспресс-оценки параметров анизотропии ФМС конструкционных материалов, полученных методом СЛС, является весьма актуальной. Качеством рабочих поверхностей изделий из этих материалов определяются эксплуатационно-ресурсные параметры конструкции в целом, а также различных разъемных соединений и фрикционных сопряжений ответственного назначения.

В связи с вышеизложенным научно-прикладная цель исследования заключается в определении функционально-структурной взаимосвязи между нестабильностью ФМС материалов, полученных методом СЛС, и спецификой их локального гидроразрушения ультраструей воды. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи по методическому обеспечению технологии ультраструйной гидрофизической диагностики (УСД), а также на конкретных примерах проиллюстрировать ее функционально-технологические возможности.

Обоснование результативности исследований. Широкие функциональные возможности технологии УСД, разрабатываемой на кафедре «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана и в «Центре гидрофизических исследований» физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, представлены в работах [5, 6]. В [7, 8] показано, что путем анализа продуктов и результатов локального эрозионно-усталостного разрушения высокоскоростной струей жидкости (воды) поверхностного слоя диагностируемого материала можно получить объективную информацию о параметрах его состояния, главным образом о ФМС и эксплуатационно-ресурсных показателях, в частности о функциональной поврежденности рабочих поверхностей анализируемого конструктивного элемента исследуемого изделия. В связи с этим открывается возможность детального анализа локально-микрogeометрической анизотропии свойств поверхности изделий, полученных методом СЛС, так как именно нестабильность формируемых ФМС рабочих поверхностей часто является лимитирующим фактором их эксплуатационно-технологической надежности.

В работах [7, 9] предложена общая структура модели гидроэрозионно-усталостного разрушения поверхностного слоя в случае изотропности его ФМС. Используя известный алгоритмический подход к построению этой модели, будем учитывать разномасштабную вариативно-циклическую нестабильность ФМС материалов, полученных методом СЛС. Эта нестабильность проявляется в периодичности изменения параметров технологических микродефектов в структуре материала, появляющихся в процессе его сплавления. Периодичность соизмерима с геометрическими размерами области сплавления лучом лазера исходного дисперсного порошка, подаваемого в зону структуро- и формообразования конструкционного материала, на технологической операции СЛС (рис. 1).

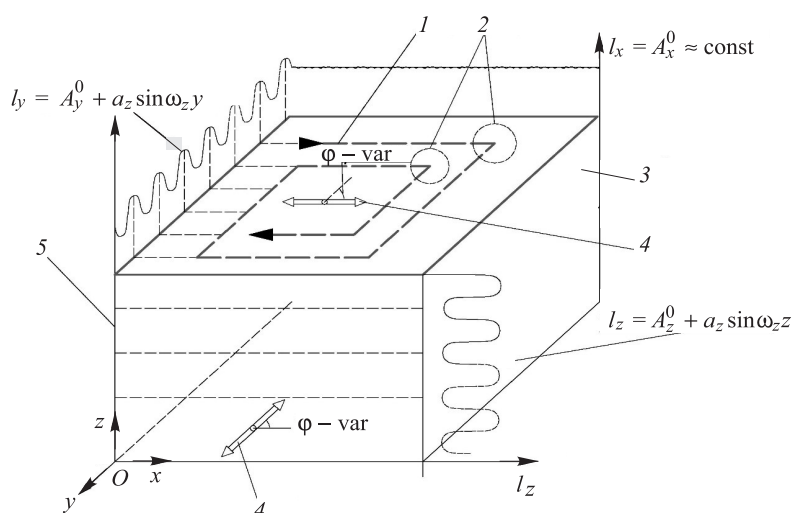


Рис. 1. Характер изменения размеров технологических микродефектов (микро- и субмикротрещин) в материале, полученном методом СЛС:

1 — возможная траектория движения лазерного луча в плоскости xy ; 2 — зоны возможной повышенной нестабильности структуры материала, возникновение которых обусловлено изменением траектории движения лазерного луча; 3 — анализируемый образец, полученный методом СЛС; 4 — траектория сканирующего диагностического воздействия ультразвука на поверхность исследуемого образца; 5 — наплавленные лазером слои материала в направлении оси Oz ; I_x, I_y, I_z — ожидаемое изменение размеров микродефектов по осям: Ox, Oy и Oz соответственно ($I_z > I_y > I_x$); $--- \rightarrow$ — направление движения лазерного луча

В работах [10, 11] экспериментально изучен вопрос о количественной координатной нестабильности ФМС образцов, полученных методом СЛС. Указанное свойство в целом определяет прочностные и главным образом усталостные и поверхностно-фрикционные характеристики образцов.

Методические особенности проведения исследований. Используя феноменологию особенностей распределения исходных технологических дефектов, представленную на рис. 1, и алгоритм гидроэрозионного разрушения, рассмотренный в [9], после выполнения соответствующих расчетных процедур получим следующие результаты моделирования процесса УСД поверхностного слоя в образце материала, полученного методом СЛС (рис. 2).

На рис. 2, *а* представлен в разрезе образец с профилем образовавшихся в результате диагностического воздействия каверн, имеющих соответствующий микрорельеф поверхности дна. На рис. 2, *б* приведена диаграмма, иллюстрирующая изменения глубины h и микрорельефа поверхности R дна гидрокаверны в зависимости от углового рассогласования φ между направлениями движения ультраструи S_{yc} и лазерного сплавления $S_{л}$ в результате диагностического воздействия на образец.

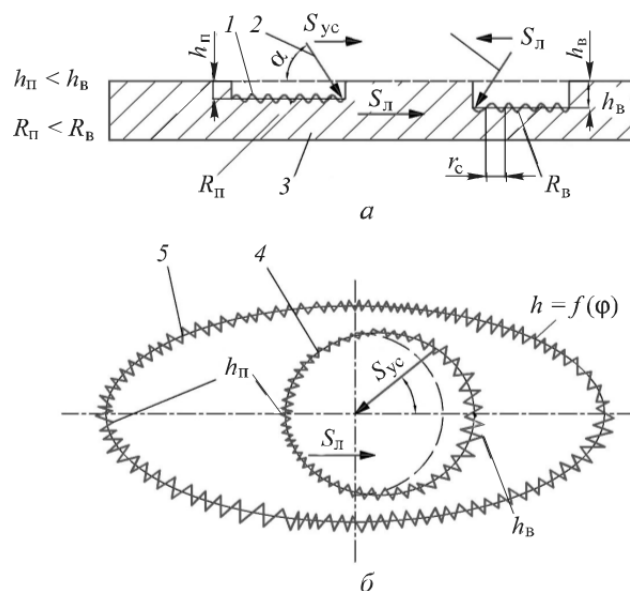


Рис. 2. Обобщенная диаграмма изменения глубины h и микрорельефа поверхности R дна гидрокаверны, полученной при различных условиях диагностического воздействия ультраструи на материал, сформированный методом СЛС:

1 — микрорельеф поверхности дна гидрокаверны; 2 — направление воздействия контрольно-диагностической ультраструи; 3 — поверхность исследуемого образца материала; 4 — диаграмма изменения глубины h гидрокаверны в зависимости от угла φ в плоскости xOy ; 5 — диаграмма изменения глубины h и микрорельефа поверхности R дна гидрокаверны в зависимости от угла φ в плоскостях yOz и xOz

На рис. 2, *а* показан также профиль дна гидрокаверны при двух направлениях сканирования ультраструей поверхности исследуемого образца. Первая каверна глубиной $h_{п}$ получена при совпадении

направлений сканирующего движения диагностической ультразвуковой S_{yc} (ее проекции на плоскость) и лазерного сплавления $S_{л}$, каверна глубиной h_b получена при встречном перемещении ультразвуковой и лазерного луча. Причем, что весьма характерно, имеют место важные информационно-диагностические неравенства вида

$$h_b > h_n; \quad R_b > R_n.$$

Степень несовпадения значений этих неравенств, т. е. величина рассогласования входящих в них информационно-диагностических параметров, характеризует микродефектную анизотропию полученного методом СЛС материала конструкций и детали в целом.

Усредненные значения h и разброс параметров R — микрогеометрии профиля дна каверны при диаметре ультразвуковой (d_c), существенно превышающем размер зоны эффективного сплавления (r_c), — в значительной мере зависят от плоскостного фактора формирования материала и изделия в целом (см. рис. 2, б). Это положение полностью коррелирует с результатами прямых прочностных экспериментов, представленных в работах [10, 11], однако оперативность их получения при использовании технологии УСД несоизмеримо выше и значительно менее затратна.

Примеры реализации возможностей технологии УСД. Тестовые эксперименты проводились на образцах, выполненных из алюминиевого порошка марки LPW 316, традиционно применяемых в РКТ [12–14]. Образцы получали, используя систему RenAM 500M компании Renishaw (Великобритания). Чтобы реализовать технологию УСД, применяли установку для гидроабразивной резки материалов фирмы Multicam WaterJet (США). Технологические параметры процесса: давление мультипликатора 350 МПа; скорость подачи сопловой головки т. е. скорость скрайбирования ультразвуковой диагностируемой поверхности, 2 мм/с; расстояние от среза фокусирующей трубки до поверхности образца 5 мм; воздействие струи воды без абразива происходило под прямым углом к поверхности. Изображение профиля гидрокаверны получено на лазерном сканирующем конфокальном микроскопе LSM 700 Carl Zeiss (Германия). Характерный результат определения значения h и разброс параметров микропрофиля поверхности R дна гидрокаверны представлены на рис. 3.

Заметим, что итоговые диаграммы результатов диагностики, представленные на рис. 2, б, получены как обобщение результатов оптических измерений геометрических параметров треков, оставленных на исследуемой поверхности сканирующей ультразвуковой воды, движущейся под различными углами к вектору $S_{л}$ — направлению предшествующего лазерного сплавления исходного порошка при формообразовании детали методом СЛС. Причем угол α , образован-

ный ультраструей и диагностируемой плоскостью исследуемого объекта, играет определенную роль в обеспечении результативности применения технологии УСД в целом.

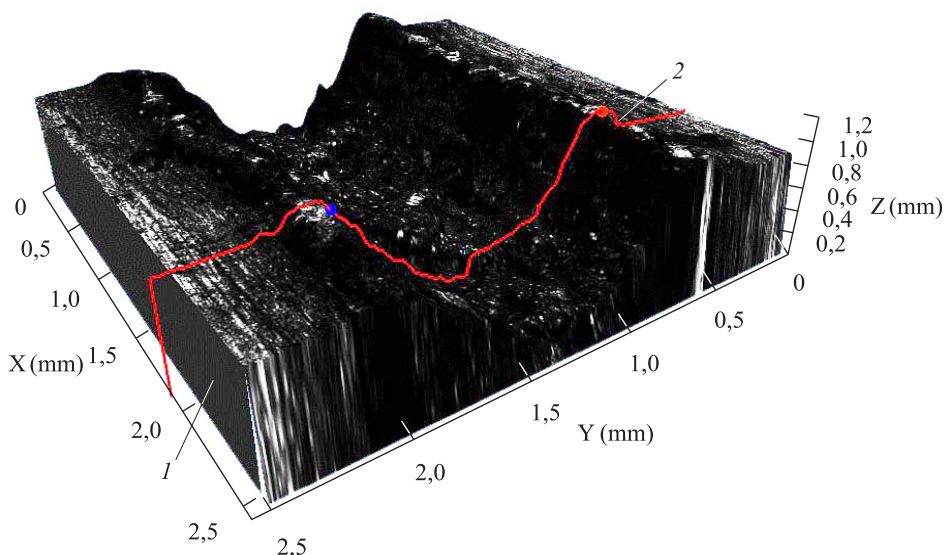


Рис. 3. Изображение гидрокаверны, полученной при использовании технологии УСД образца из алюминиевого сплава:

1 — исследуемая часть образца; 2 — профиль гидрокаверны на поверхности образца

По результатам выполненного анализа можно сделать следующие основные выводы и сформулировать некоторые обобщения.

1. Изменение микрорельефа поверхности в донной части каверны функционально-количественно копирует закономерности распределений микродефектов l_x , l_y , l_z . Указанное обстоятельство является важнейшим информационно-диагностическим параметром качества аддитивных технологий, в частности метода СЛС. Механизм этого наследственно-технологического копирования подробно рассмотрен в [13].

2. О качестве процесса СЛС можно судить по разности глубин эрозионных гидрокаверн, сформированных на поверхности образца при «попутном» и «встречном» движении ультраструи относительно траектории луча лазера. Этот параметр называют «кинематическим фактором» диагностирования; применительно к другим условиям его проявления проанализированы в [13].

3. В зоне изменения траектории луча (см. рис. 1, поз. 2) четкие закономерности в характеристиках гидроэрозионного разрушения ультраструей поверхности материала, полученного методом СЛС, выделить не удалось.

Заметим, что потенциально весьма значимые результаты, полученные при УСД изделий, которые изготовлены по аддитивным технологиям, в частности методом СЛС, будут в дальнейшем верифицированы путем ресурсных, например усталостных и (или) фрикционных, испытаний; кроме того, будут также проведены испытания после определенного периода эксплуатации анализируемых изделий.

Ультразвуковая диагностика позволяет оценить характер и особенности послойного формирования эксплуатационно-физической поврежденности, что может быть использовано для прогнозирования остаточного ресурса изделий из материалов, отличающихся особыми ФМС. В этом случае представленные на рис. 1 исходные распределения технологических микродефектов должны быть дополнены зависимостями их количественно-размерного изменения в процессе эксплуатации. Возможный вариант такого распределения показан на рис. 4.

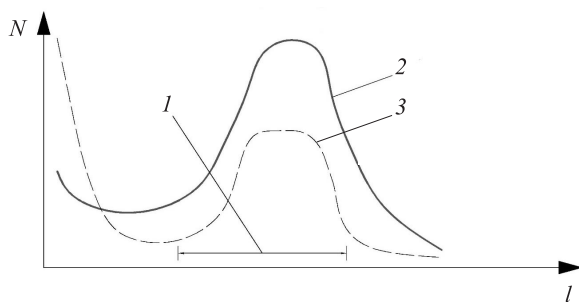


Рис. 4. Возможный характер изменения распределения числа N трещиноподобных микродефектов, нормируемого на максимальную или суммарную величину числа функционально значимых микродефектов в единице объема материала, в зависимости от их характерного размера l :

l — величина характерных дефектов $\Delta l = l_{\max} - l_{\min}$ по границам зоны сплавления исходного порошка; 2 — распределение дефектов через определенное время ресурсных испытаний или определенный период эксплуатации; 3 — исходное, технологическое распределение дефектов в материале, полученном методом СЛС

Отличительная черта этого распределения состоит в существенном увеличении числа микродефектов по границам зон сплавления с увеличением продолжительности силового воздействия на материал, при этом векторный характер поврежденности конструкции выражен более отчетливо. Общий подход к определению вида функции $N(l) = f(l)$, рассмотренный в [9], может быть адаптирован к варианту экспресс-диагностирования ФМС поверхностного слоя аддитивных материалов путем воздействия на них ультразвуку воды или специальной суспензии. Особенности микроструктуры аддитивных материалов, в частности сформированных методом СЛС, металлографически подтверждают наличие выраженных зон сплавления, обладаю-

щих определенной анизотропией ФМС [13–15]. Результаты УСД материалов, полученных методом СЛС, полностью коррелируют с результатами масштабных прямых экспериментальных исследований [9].

Таким образом, технология УСД, используемая при изучении проблем качества аддитивных материалов, дополняет известные методы неразрушающего контроля, диагностики и испытаний изделий. Кроме того, применение технологии УСД на ранних этапах жизненного цикла изделий позволит в значительной мере обеспечить функциональную адекватность ресурсно-прочностных расчетов при их проектировании путем экспресс-определения необходимых параметров ФМС при конструкторско-технологической отработке изделия. На этапе индивидуально-серийного изготовления изделий из аддитивных материалов нетрудно сформировать образцы-свидетели, экспресс-оценка свойств которых после их УСД позволит более обоснованно судить о рациональности и стабильности технологического обеспечения качества изделий, полученных по аддитивным технологиям, в частности методом СЛС.

В качестве примера на рис. 5 показан фитинг каркаса рефлектора космического телескопа «Миллиметрон» со специально подготовленным фрагментом (образцом-свидетелем), подвергаемым процедуре УСД. Схема расположения образцов и фитинга в системе для аддитивной печати методом СЛС представлена на рис. 6. Исследование этих образцов позволит не только определить характеристики используемых материалов, но и провести анализ локально-микроскопической анизотропии свойств поверхности изделий с помощью УСД, а также получить объективную информацию о ФМС, эксплуатационно-ресурсных показателях и др.

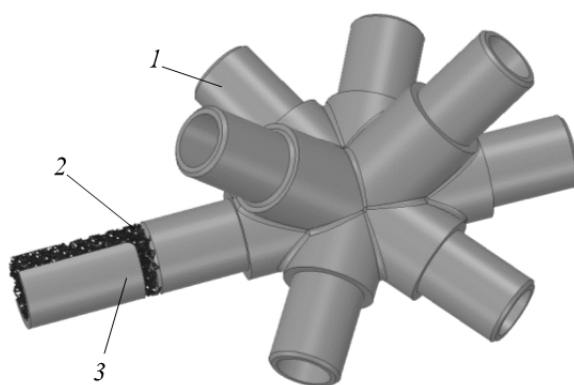


Рис. 5. Фитинг каркаса рефлектора космического телескопа «Миллиметрон» (выделен фрагмент для УСД):

1 — фитинг; 2 — технологические поддержки; 3 — диагностируемая зона

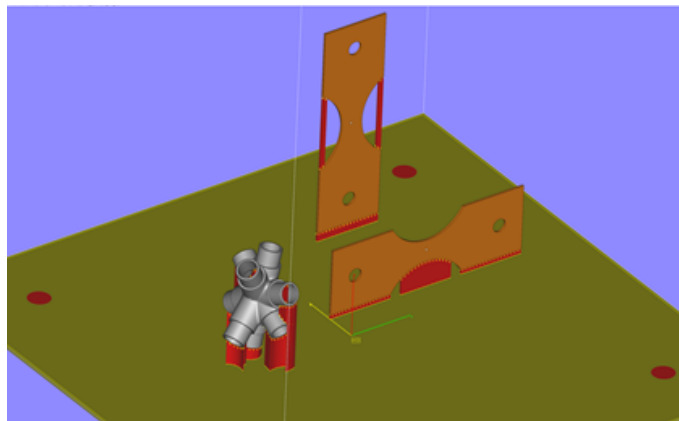


Рис. 6. Размещение экспериментальных образцов и фитинга в системе аддитивной печати методом СЛС

В будущем не исключено и более масштабное использование технологии УСД для оценки параметров ФМС и эксплуатационно-физической поврежденности аддитивных конструкционных материалов в процессе функционирования изделий ответственного назначения [16–19] (рис. 7).



Рис. 7. Структурная схема взаимодействия ультразвуковых и аддитивных технологий

Заключение. В результате выполненного исследования достигнута поставленная цель работы и решены задачи по научно-методическому обоснованию потенциала результативности УСД параметров анизотропной нестабильности ФМС материалов и деталей, полученных методом СЛС. Физико-технологической основой

достижения цели и решения поставленных задач являлось верифицированное натурными экспериментами на образцах и моделях реальных деталей утверждение о значимом влиянии разброса ФМС поверхностного слоя материала, сформированного методом СЛС, на инструментально диагностируемую специфику его локального гидроэрозионного разрушения под ударно-динамическим воздействием ультразвука воды.

Отметим, что теоретическое и экспериментальное обоснование результативности применения УСД в аддитивных технологиях не только дополняет известный и развивающийся арсенал средств изучения их функциональных возможностей, но и является инструментом получения новых знаний о специфике ФМС материалов, полученных по данным прогрессивным технологиям, в частности об их локальной анизотропии, что необходимо учитывать на всех этапах жизненного цикла изделий РКТ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алешин Н.П., Мурашов В.В., Евгенов А.Г., Григорьев М.В., Щипаков Н.А., Василенко С.А., Краснов И.С. Классификация дефектов металлических материалов, синтезированных методом селективного лазерного сплавления, и возможности методов неразрушающего контроля для их обнаружения. *Дефектоскопия*, 2016, № 1, с. 48–55.
- [2] Бабенцова Л.П., Анциферова И.В. Качество и экология технологии селективного лазерного спекания. *Master's Journal*, 2017, № 1, с. 87–92.
- [3] Косушкин П.А. Контроль качества в аддитивном производстве. *Вектор высоких технологий*, 2017, № 2 (31), с. 28–31.
- [4] Рыжков Е.В., Павлов М.Д., Гусаров А.В., Артеменко Ю.А., Васильцов В.В. Образование трещин при селективном лазерном спекании керамики. *Физика и химия обработки материалов*, 2011, № 1, с. 77–83.
- [5] Хвастунев Р.М., Ягелло О.И., Корнеева В.М., Поликарпо М.П. *Экспертные оценки в квалиметрии машиностроения*. Москва, Технонефтегаз, 2012, 395 с.
- [6] Галиновский А.Л., Самсонов К.С., Севрюкова А.В., Салахатдинова А.Р. Сравнение различных методов контроля и диагностики качества керамики методом экспертного оценивания. *Инноватика и экспертиза: научные труды*, 2017, № 1 (19), с. 64–74.
- [7] Абашин М.И. *Ускоренное определение параметров качества поверхностного слоя материала изделий по результатам воздействия на него сверхзвуковой струи жидкости*. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, 17 с.
- [8] Абашин М.И., Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Коберник Н.В. Ультразвуковая диагностика качества сварных швов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 12 (669), с. 52–61.
- [9] Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Галиновский А.Л., Абашин М.И., Барзов А.А. Ультразвуковая диагностика микроструктуры материала при термической обработке. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2017, № 6 (744), с. 58–63.

- [10] Kok Y., et al. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing. A critical review. *Materials and Design*, 2018, no. 139, Supplement C, pp. 565–586.
- [11] Popovich A.A., Sufiarov V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V., Grigoriev A.V. Anisotropy of mechanical properties of products manufactured using selective laser melting of powdered materials. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2017, vol. 58, no. 4, pp. 389–395.
- [12] Sklyar M.O., Turichin G.A., Klimova O.G., Zotov O.G., Topalov I.K. Microstructure of 316L stainless steel components produced by direct laser deposition. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, iss. 12, pp. 883–887.
- [13] Wang Z., Palmer T.A., Beese A.M. Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing, *Acta Mater*, 2016, no. 110, pp. 226–235.
- [14] Hussam E. C., Bruno C., Branchu S., Xiaowei H., Hasco J. Y., Guille R. Direct Laser Fabrication process with coaxial powder projection of 316L steel. Geometrical characteristics and microstructure characterization of wall structures. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, vol. 50, pp. 1779–1784.
- [15] Базалева К.О., Цветкова Е.В., Балакирев Э.В. Процессы рекристаллизации аустенитного сплава, полученного методом селективного лазерного плавления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 5, с. 117–127.
- [16] Shvartsev S.L. Do additive technologies have a future? *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 87, no. 3, pp. 267–275.
- [17] Леоненков А.Д., Двирный В.В. Перспективы применения аддитивных технологий в аэрокосмической отрасли. *Сборник трудов Международной научной конференции «Решетневские чтения–2017». Часть. 2.* Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2017, с. 632–633.
- [18] Ковалев Д.С., Коваленко П.А. Перспективы внедрения аддитивных технологий в промышленность. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2017, т. 1, № 13, с. 398–400.
- [19] Советников Е.И. Оценки развития аддитивных технологий. *Технология лёгких сплавов*, 2015, № 3, с. 17–31.

Статья поступила в редакцию 05.04.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Барзов А.А., Галиновский А.Л., Голубев Е.С., Сысоев Н.Н., Федянин А.А., Филимонов А.С. Ультраслойная экспресс-диагностика анизотропии поверхностного слоя материалов и изделий ракетно-космической техники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-6-1773>

Барзов Александр Александрович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: a.a.barzov@gmail.com

Галиновский Андрей Леонидович — д-р техн. наук, д-р пед. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: galcomputer@mail.ru

Голубев Евгений Сергеевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: golubev.ev@asc.rssi.ru

Сысоев Николай Николаевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, декан физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. e-mail: nn.sysoev@physics.msu.ru

Федянин Андрей Анатольевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, зам. декана физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. e-mail: fedyanin@shg.ru

Филимонов Алексей Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заместитель декана факультета «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: alexf72@mail.ru

Superjet express diagnostics of the surface layer anisotropy of materials and products of rocket and space equipment

© A.A. Barzov¹, A.L. Galynovsky¹, E.S. Golubev¹, N.N. Sysoev²,
A.A. Fedyanin², A.S. Filimonov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

The problem of express diagnostics of the parameter spread which determine the quality of the surface layer of parts obtained by selective laser fusion is one of the factors limiting the large-scale application of this technology in current machine-building production of critical products. The article shows the possibility of solving this problem by applying the technology of superjet hydrophysical diagnostics. This technology is based on the analysis of the results obtained by erosive local material surface destruction of the part or sample by super-fast hydrojet. The examples illustrating the high information and technological potential of the superjet hydrophysical diagnostics technology are presented. It is shown that using superjet diagnostics largely ensures obtaining the information necessary for improving the quality of realization of all stages of the product life cycle where applying additive technologies in production is promising. On the example of the unit-forming element of the reflector framework of the space telescope "Millimetron" it is shown that the approaches proposed can be used in the process of technological preparation of rocket and space equipment production.

Keywords: selective laser fusion, superjet diagnostics, anisotropy of material properties, physical and mechanical properties

REFERENCES

- [1] Aleshin N.P., Murashov V.V., Evgenov A.G., Grigoriev M.V., Shchipakov N.A., Vasilenko S.A., Krasnov I.S. *Defektoskopiya — Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, no. 1, pp. 48–55.
- [2] Babentsova L.P., Antsiferova I.V. *Master's Journal*, 2017, no. 1, pp. 87–92.
- [3] Kosushkin P.A. *Vektor vysokikh tekhnologiy — Vector of High Technologies*, 2017, no. 2 (31), pp. 28–31.
- [4] Ryzhkov E.V., Pavlov M.D., Gusarov A.V., Artemenko Yu.A., Vasiltsov V.V. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of material processing*, 2011, no. 1, pp. 77–83.
- [5] Khvastunov R.M., Yagello O.I., Korneeva V.M., Polikarpo M.P. *Ekspertnye otsenki v kvalimetrii mashinostroeniya* [Expert assessments in mechanical engineering qualimetry]. Moscow, Tekhnoneftegaz Publ., 2012, 395 p.
- [6] Galinovsky A.L., Samsonov K.S., Sevryukova A.V., Salakhatdinova A.R. *Innovatika i ekspertiza: nauchnye trudy — Innovatics and Expert Examination*, 2017, no. 1 (19), pp. 64–74.
- [7] Abashin M.I. *Uskorennoe opredelenie parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya materiala izdeliy po rezultatam vozdeystviya na nego sverkhzvukovoy strui zhidkosti*. Diss. cand. tekhn. nauk. Avtoreferat [Accelerated determining parameters of quality of a product material surface layer by the results of affecting it by a supersonic jet of a liquid. Cand. Eng. sc. diss. Abstract]. Moscow, BMSTU Publ., 2013, 17 p.

- [8] Abashin M.I., Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Kobernik N.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 12 (669), pp. 52–61.
- [9] Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Galinovsky A.L., Abashin M.I., Barzov A.A. *Metallovedenie i termooobrabotka metallov — Physical Metallurgy and Metal Heat Treatment*, 2017, no. 6 (744), pp. 58–63.
- [10] Kok Y., et al. *Materials and Design*, 2018, vol. 139, pp. 565–586.
- [11] Popovich A.A., Sufiiarov V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V., Grigoriev A.V. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2017, vol. 58, no. 4, pp. 389–395.
- [12] Sklyar M.O., Turichin G.A., Klimova O.G., Zotov O.G., Topalov I.K. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 12, pp. 883–887.
- [13] Wang Z., Palmer T.A., Beese A.M. *Acta Materialia*, 2016, no. 110, pp. 226–235.
- [14] Hussam E.C., Bruno C., Branchu S., Xiaowei H., Hasco J. Y., Guille R. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, vol. 50, pp. 1779–1784.
- [15] Bazaleeva K.O., Tsvetkova E.V., Balakirev E.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2016, no. 5, pp. 117–127.
- [16] Shvartsev S.L. *Vestnik Rossiyskoy Akademii nauk — Herald of the Russian academy of Sciences*, 2017, vol. 87, no. 3, pp. 267–275.
- [17] Leonenkov A.D., Dvirny V.V. Perspektivy primeneniya adaptivnykh tekhnologiy v aerokosmicheskoy otrasli [Prospects of applying additive Technologies in the aerospace Industry]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Reshetnevskie chteniya 2017”. Chast 2* [Proceedings of the International scientific conference “Reshetnev's readings 2017”. Part 2]. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology Publ., 2017, pp. 632–633.
- [18] Kovalev D.S., Kovalenko P.A. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki — Actual problems of aviation and cosmonautic*, 2017, vol. 1, no. 13, pp. 398–400.
- [19] Sovetnikov E.I. *Tekhnologiya legkikh splavov — Technology of Light Alloys*, 2015, no. 3, pp. 17–31.

Barzov A.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Technologies of Space-Rocket Building, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: a.a.barzov@gmail.com

Galinovsky A.L., Dr. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Pedag.), Professor, Head of the Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: galcomputer@mail.ru

Golubev E.S., post-graduate student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: golubev.ev@asc.rssi.ru

Sysoev N.N., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. e-mail: nn.sysoev@physics.msu.ru

Fedyanin A.A., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Deputy Head of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. e-mail: fedyanin@shg.ru

Filimonov A.S., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Deputy Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: alexf72@mail.ru