

3. Комбайн зерноуборочный самоходный КЗС-10К «ПАЛЕССЕ GS10»: инструкция по эксплуатации. – Гомель: Гомсельмаш, 2016 – 277 с.

4 Анализ закономерностей изменения скоростей резания режущих аппаратов зерноуборочных

комбайнов [Текст] / Н.О. Петрович [и др.] // Агропанорама. – 2018. – № 3. – С. 2-5.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 24.01.2019

УДК 621.77.04

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМА СТУПЕНЧАТОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Н.К. Толочко,

профессор каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ, докт. ф.-м. наук, профессор

О.В. Сокол,

ст. преподаватель каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ

Рассмотрены особенности формирования ступенчатого рельефа на поверхности деталей, создаваемых с помощью аддитивных технологий. Обсуждены возможные пути уменьшения этого рельефа.

Ключевые слова: аддитивные технологии, ступенчатый поверхностный рельеф, толщина слоев.

The features of the formation of a staircase relief on the surface of parts created using additive technologies have been considered. Possible ways to reduce this relief have been discussed.

Keywords: additive technology, staircase surface relief, layer thickness.

Введение

Аддитивные технологии, или технологии 3D-печати, позволяют сравнительно быстро создавать изделия сложных форм непосредственно по их компьютерным моделям, благодаря чему они получают все большее распространение при производстве деталей машин. Вместе с тем эти технологии имеют ряд недостатков, сдерживающих их широкое применение. Одним из таких недостатков, которым обладают аддитивные технологии в силу присущего им послойного характера построения изделий, является формирование ступенчатого рельефа наклонных или криволинейных поверхностей создаваемых деталей, что часто рассматривается как весьма нежелательное явление с учетом требований, предъявляемых к качеству деталей.

Данная статья посвящена анализу особенностей формирования и путей снижения ступенчатого рельефа поверхности деталей, создаваемых с помощью аддитивных технологий. В последние годы изучению этих вопросов уделяется повышенное внимание, о чем свидетельствует все возрастающее число публикаций по соответствующей тематике.

Основная часть

При создании деталей с помощью аддитивных технологий ступенчатый рельеф формируется как на наклонных, так и криволинейных поверхностях, причем и в том, и другом случае ступеньки рельефа могут образовываться как в пределах CAD-поверхности проектируемых деталей, так и за ее пределами [1-3]. Следствием формирования ступенчатого рельефа являются погрешности построения деталей. Возмож-

ные схемы формирования ступенчатого рельефа поверхностей деталей, создаваемых с помощью аддитивных технологий, показаны на рис. 1.

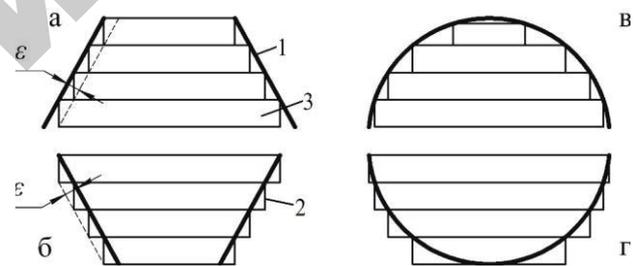


Рис. 1. Схемы формирования ступенчатого рельефа наклонных (а, б) и криволинейных (в, г) поверхностей ЛОМ-деталей:

- 1 – CAD-поверхность проектируемой детали;
- 2 – ступенчатый рельеф изготовленной детали;
- 3 – наращиваемые слои детали

Величина погрешности построения ε определяется расстоянием между вершинами впадин рельефа и CAD-поверхностью деталей, если ступеньки рельефа образуются в пределах CAD-поверхности (рис. 1а, в), и между вершинами выступов рельефа и CAD-поверхностью деталей, если ступеньки рельефа образуются за пределами CAD-поверхности (рис. 1б, г). В случае, когда ступенчатый рельеф формируется на наклонных прямолинейных поверхностях (рис. 1а, б), величина ε остается постоянной на всех участках поверхности, и, наоборот, в случае, когда ступенчатый рельеф формируется на криволинейных поверхностях, величина ε изменяется на разных участках поверхности (рис. 1в, г).

На рис. 2 схематично показан фрагмент ступенчатого рельефа наклонной поверхности LOM-детали. Погрешность построения ε определяется по формуле:

$$\varepsilon = h \cos \alpha, \quad (1)$$

где h – высота ступеньки рельефа, равная толщине слоев детали;

α – угол наклона CAD-поверхности детали относительно горизонтальной строительной платформы.

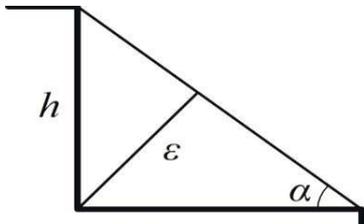


Рис. 2. Фрагмент ступенчатого рельефа поверхности

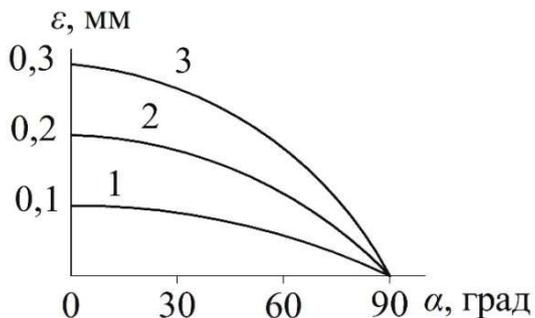


Рис. 3. Зависимость погрешности построения ε от угла наклона α для разной толщины слоев: $h = 0,1$ (1), $0,2$ (2) и $0,3$ мм (3)

Как следует из формулы (1), погрешность ε уменьшается с уменьшением толщины слоев h и с увеличением угла наклона α ($\varepsilon = 0$ при $\alpha = 90^\circ$). На рис. 3 показаны типичные зависимости $\varepsilon(\alpha)$ для разных значений h .

Углы наклона поверхностей создаваемых деталей задаются формой деталей. Поэтому для снижения ступенчатого рельефа желательно выбирать для построения такие по форме детали, у которых углы наклона поверхностей или их отдельных участков близки к 90° , а в лучшем случае равны 90° . Однако возможности такого выбора весьма ограничены.

На практике снижение ступенчатого рельефа обеспечивается уменьшением толщины слоев, а также рациональным ориентированием слоев.

Уменьшение толщины слоев – наиболее распространенный путь снижения ступенчатого рельефа. Аддитивные технологии позволяют наращивать довольно тонкие слои. Однако в силу особенностей процессов наращивания, толщину слоев можно уменьшать до определенных пределов, что накладывает соответствующие ограничения на возможности снижения ступенчатого рельефа (табл. 1) [4-13].

Кроме того, с уменьшением толщины слоев, растет продолжительность и себестоимость изготовления деталей [13]. Рассмотрим этот вопрос на примере построения металлических LOM-деталей. Построение таких деталей может происходить по разным схемам, различающимся последовательностью операций построения: 1) «пакетирование-раскрой-соединение»; 2) «пакетирование-соединение-раскрой»; 3) «раскрой-пакетирование-соединение» [14]. В свою очередь, каждая из этих схем может реализовываться по разным вариантам, различающимся способами выполнения отдельных операций построения. Выберем для рассмотрения наиболее простой и экономичный вариант построения по схеме «раскрой-пакетирование-соединение», согласно которому металлические листы подвергаются лазерному раскрою с одновременным формированием отверстий под болты, после чего полученные выкройки пакетируют в стопку, которую стягивают болтами [13].

Общая продолжительность изготовления единичной LOM-детали

Таблица 1. Типичные пределы изменения толщины (h) наращиваемых слоев для разных видов аддитивных технологий

Виды технологий*	SLA	SLS	SLM	3DP	MJM	FDM	LOM
h_{\min} , мм	0,016	0,02	0,02	0,076	0,016	0,1	0,1
h_{\max} , мм	0,25	0,25	0,2	0,254	0,032	0,5	3,0

*Виды технологий:

SLA (Stereolithography Apparatus) – послойное нанесение жидкой фотополимерной смолы, селективное затвердевание слоев под действием луча ультрафиолетового лазера [4, 5].

SLS (Selective Laser Sintering) – послойное нанесение металлических и/или неметаллических порошков, селективное спекание слоев лазерным лучом [6, 7].

SLM (Selective Laser Melting) – послойное нанесение металлических порошков, селективное плавление слоев лазерным лучом [8].

3DP (3D Printing) – послойное нанесение металлических или неметаллических порошков, селективная подача на слои жидкого связующего (клеевого) материала [5].

MJM (Multi-Jet Modeling) – подача жидкой фотополимерной смолы или расплавленного воска каплями непосредственно в место построения детали, где материал затвердевает под действием ультрафиолетового излучения или в результате охлаждения [9].

FDM (Fused Deposition Modeling) – послойная подача расплавленного термопластичного волокна непосредственно в место построения детали, где материал затвердевает в результате охлаждения [10, 11].

LOM (Laminated Object Manufacturing) – пакетирование и соединение листовых выкроек, полученных путем раскроя листовых материалов [12, 13].

$$T = (t_p + t_n)n + t_c, \quad (2)$$

где t_p и t_n – время выполнения циклически повторяющихся операций раскроя (среднее значение) и пакетирования, соответственно, час;

t_c – время соединения выкроек, уложенных в стопку, час;

n – общее число выкроек, из которых строится деталь (предполагается, что все выкройки имеют одинаковую толщину).

Технологическая себестоимость единичной ЛОМ-детали

$$C = C_M + C_{\text{Э}} + C_{\text{Экс}} + C_3, \quad (3)$$

где C_M – затраты на материалы;

$C_{\text{Э}}$ – затраты на энергию;

$C_{\text{Экс}}$ – затраты на эксплуатацию оборудования;

C_3 – затраты на зарплату.

Затраты на материалы (без учета крепежных деталей, используемых для соединения выкроек)

$$C_M = C_M (V_D + V_{Om}), \quad (4)$$

где C_M – цена единицы объема листового металла, руб./м³;

V_D – объем детали, м³;

V_{Om} – объем отходов листового металла (неиспользованной части раскроенных металлических листов), м³

$$V_D = Shn, \quad (5)$$

где S – средняя площадь выкройки, м².

Затраты на энергию

$$C_{\text{Э}} = C_{\text{Э}} P t_p n, \quad (6)$$

где $C_{\text{Э}}$ – цена единицы потребляемой электроэнергии, руб./кВт·час;

P – электрическая мощность, потребляемая лазерным раскройным оборудованием, кВт.

Затраты на эксплуатацию оборудования

$$C_{\text{Экс}} = \frac{C_o}{\tau F} t_p n, \quad (7)$$

где C_o – цена (покупная стоимость) оборудования, руб.;

τ – срок амортизации оборудования, годы;

F – эффективный годовой фонд времени работы оборудования, час/год.

Затраты на зарплату

$$C_3 = C_{3o} T, \quad (8)$$

где C_{3o} – зарплата работников за единицу времени работы, руб./час.

Болтовое соединение уложенных в пакет выкроек представляет собой одноразовую операцию, время выполнения которой гораздо меньше общего времени выполнения всех циклически повторяющихся операций раскроя и пакетирования, поэтому значением t_c можно пренебречь. Использование современных программ экономного раскроя листовых материалов позволяет существенно уменьшить их отходы, поэтому значением V_{Om} также можно пренебречь.

Общее число выкроек n определяется высотой детали H (м) и толщиной выкроек, h :

$$n = \frac{H}{h}. \quad (9)$$

С учетом сделанных допущений, а также формулы (9) уравнение (2) можно представить в следующем виде:

$$T \approx (t_p + t_n) \frac{H}{h}. \quad (10)$$

С учетом сделанных допущений, а также формул (4-9) уравнение (3) можно представить в следующем виде:

$$C \approx C_M SH + \left[\left(C_{\text{Э}} P + \frac{C_o}{\tau F} \right) t_p + C_{3o} (t_p + t_n) \right] \frac{H}{h}. \quad (11)$$

Как видно из уравнений (10) и (11), продолжительность T и себестоимость C построения единичной ЛОМ-детали заданной высоты H нелинейно (все более сильно) увеличиваются с уменьшением толщины выкроек h .

Следует заметить, что затраты на построение металлических ЛОМ-деталей особенно резко возрастают при использовании выкроек предельно малой толщины (~ 0,1 мм), получаемых из металлической фольги, поскольку в этом случае для построения применяются специальные дорогостоящие ЛОМ-принтеры (при этом построение осуществляется по схемам «пакетирование-раскрой-соединение» или «пакетирование-соединение-раскрой») [14].

Аналогичное по характеру увеличение продолжительности и себестоимости построения деталей с уменьшением толщины слоев имеет место и для других видов аддитивных технологий.

В рассмотренном выше варианте снижения ступенчатого рельефа за счет уменьшения толщины слоев предполагалось, что все слои имеют одинаковую толщину, т.е. САД-модель равномерно расслаивается вдоль направления построения. Такой вариант сравнительно прост в реализации, однако в тех случаях, когда изделия имеют криволинейные поверхности, равномерное расслаивание оказывается недостаточно эффективным, и вместо него предпочтение отдается адаптивному расслаиванию. Суть адаптивного расслаивания состоит в том, что толщину слоев изменяют вдоль направления построения по заданной программе: уменьшают, если угол наклона наращиваемых частей поверхности изделия мал, и, наоборот, увеличивают до довольно больших значений, если угол наклона равен 90° или близок к 90° [15]. Благодаря этому, удается не только обеспечить снижение ступенчатого рельефа поверхности на всем ее протяжении вдоль направления построения, но также сократить число необходимых слоев и тем самым снизить продолжительность и себестоимость построения. Однако возможности адаптивного расслаивания ограничиваются узким диапазоном изменения толщины слоев, характерным для аддитивных технологий (табл. 1). Кроме того, для изменения толщины слоев по мере их наращивания требуется соответ-

ствующее изменение параметров процесса формирования слоев, что ведет к усложнению этого процесса. Исключением является LOM-технология, которая при ее реализации по схеме «раскрой-пакетирование-соединение» позволяет легко варьировать толщину пакетизируемых листовых выкроек (от 0,1 мм до нескольких миллиметров) путем раскроя листов исходного материала разной толщины [16].

Величина ступенчатого рельефа зависит не только от толщины слоев, но и от их ориентации. Поэтому, выбирая оптимальное направление расслаивания CAD-моделей, можно обеспечить существенное снижение ступенчатого рельефа [17, 18]. При этом следует учитывать, что ориентация слоев также способна влиять на число необходимых для построения слоев, объем подпирającego материала, механическую прочность создаваемых деталей. Такое многофакторное влияние ориентации слоев на процесс построения может приводить к ситуациям, когда та или иная ориентация слоев, выбранная с целью снижения ступенчатого рельефа, будет оказывать отрицательное, порой недопустимое влияние на другие параметры этого процесса. Примером тому являются представленные на рис. 4 варианты ориентации слоев при построении LOM-деталей из металлических листовых выкроек, соединенных адгезивом. При вертикальной ориентации слоев практически полностью исключается формирование ступенчатого рельефа, однако создаваемая при этом деталь не в состоянии выдерживать значительные сжимающие и сдвиговые нагрузки в вертикальном направлении, поскольку они могут привести к ее расслаиванию из-за разрушения прослоек адгезива. Во избежание этого следует использовать горизонтальную ориентацию слоев, однако в этом случае боковые поверхности создаваемой детали будут иметь ярко выраженный ступенчатый рельеф.

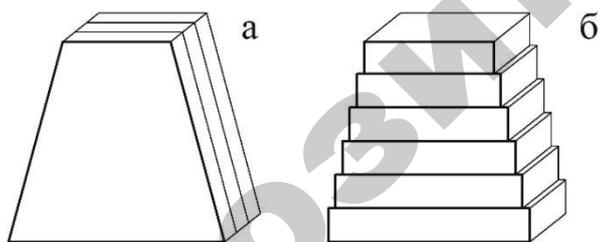


Рис. 4. Два варианта построения LOM-изделия с вертикальной (а) и горизонтальной (б) ориентацией слоев

Обычно при выборе ориентации расслаивания предполагается, что деталь строится из параллельных слоев. Если деталь имеет сложную форму с выступами или изгибами, то для снижения ступенчатого рельефа на соответствующих участках детали, ориентация расслаивания изменяется [19]. В простейшем случае направление ряда параллельных слоев изменяется на 90°. Более эффективным способом снижения ступенчатого рельефа является постепенный поворот

слоев в своем расположении с учетом особенностей формы создаваемой детали – так называемое, многоосевое расслаивание. В результате такого расслаивания образуется ряд слоев неоднородной толщины, благодаря чему обеспечивается наибольшее соответствие поверхностей построенной детали и ее CAD-модели. Однако обеспечить контролируемое изменение толщины слоя на его различных участках довольно трудно, а порой и невозможно (с учетом особенностей построения, присущих разным видам аддитивных технологий). Например, в SLS-технологии слой переменной толщины формируется путем соответствующего управления параметрами лазерной обработки [19].

Снижение ступенчатого рельефа уменьшением толщины слоев, а также рациональным ориентированием слоев нередко оказывается недостаточным. Поэтому поверхности построенных деталей, как правило, подвергаются дополнительной обработке (пост-обработке), в результате которой может быть достигнуто практически полное удаление ступенчатого рельефа. Пост-обработка осуществляется разными способами: фрезерованием (на станках с ЧПУ), шлифованием, полированием, дробеструйной и пескоструйной обработкой, лазерным оплавлением и т.д. [20, 21].

Заключение

Формирование ступенчатого рельефа поверхностей деталей, создаваемых с помощью аддитивных технологий, является неизбежным следствием присутствия этим технологиям послойного характера построения деталей. Поскольку для большинства деталей требуется обеспечивать высокое геометрическое качество поверхности, то предпринимаются специальные меры по снижению ступенчатого рельефа в процессе построения деталей. В основном эти меры сводятся к уменьшению толщины наращиваемых слоев и выбору их рациональной ориентации. Однако эти меры недостаточно эффективны, поэтому представляется актуальным поиск новых, альтернативных способов решения проблемы ступенчатого рельефа. Кроме того, следует считать целесообразным пересмотр требований по обеспечению высокого геометрического качества поверхности деталей, создаваемых с помощью аддитивных технологий. Очевидно, строгость выполнения этих требований должна оставаться, прежде всего, в отношении сопрягаемых поверхностей деталей узлов трения, а также в случаях, связанных с необходимостью придания деталям надлежащего внешнего вида.

Среди всех видов аддитивных технологий особое место занимает LOM-технология, для которой характерны некоторые отличительные особенности, связанные с формированием ступенчатого рельефа. В первую очередь, LOM-детали создаются из слоев в виде листовых выкроек, толщина которых может варьироваться в широких пределах (табл. 1). Как следствие, при построении LOM-деталей можно использовать

толстые выкройки с целью снижения продолжительности и стоимости построения, если, конечно, это допустимо условиями эксплуатации деталей. Во-вторых, во время раскроя исходных листовых материалов поверхность реза можно ориентировать под заданным углом к плоскости получаемых выкроек с помощью 5-координатного раскроечного оборудования [16, 22]. Это позволяет при построении LOM-деталей за счет изменения угла реза существенно снижать ступенчатый рельеф даже в тех случаях, когда для построения используются довольно толстые выкройки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ancau, M. The Optimization of Surface Quality in Rapid Prototyping / M. Ancau, C. Caizar // WSEAS Int. Conf. Engineering mechanics, structures, engineering geology (EMESG '08). Heraklion, Crete Island, Greece, July 22-24, 2008. – P. 136-141.
2. Ibrahim, D. Roughness prediction for FDM produced surfaces / D. Ibrahim, S. Ding, S. Sun // Int. Conf. Recent trends in engineering & technology (ICRET'2014). Batam (Indonesia), Feb 13-14, 2014. – P. 70-74.
3. Pereira, S., Vaz, A.I.F., Vicente, L.N. On the optimal object orientation in additive manufacturing // Int. J. Adv. Manufacturing Technology, 2018. – Vol. 98. Iss. 5-8. – P. 1685-1694.
4. Колесников, Л.А. Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности: ч. 1 / Л.А. Колесников, Г.П. Манжула, В.К. Шелег, А.М. Якимович // Наука и техника. – 2013. – № 5. – С. 3–9.
5. Кузнецов, В. Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения / В. Кузнецов // CAD/CAM/CAE Observer. – 2003. – №4. – С. 2-7.
6. Zong, G. Direct selective laser sintering of high temperature materials / G. Zong [et al] // Proc. Conf. Solid Freeform Fabrication, University of Texas at Austin, – 1992. – P. 7-85.
7. Kruth, J.P. Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser / J.P. Kruth [et al] // Rapid Prototyping J. – 2005. – Vol. 11. – Iss. 1. – P. 26-36.
8. Shi, X. Performance of High Layer Thickness in Selective Laser Melting of Ti6Al4V / X. Shi [et al] // Materials. – 2016. – № 9. – P. 975-989.
9. Stanek, M. Comparison of different rapid prototyping methods / M. Stanek [et al] // Int. J. Math. & Comp. Simulation. – 2012. – Vol. 6. – Iss. 6. – P. 550-557.
10. Nugroho, A. Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (PolyLactid Acid) by 3D printing / A. Nugroho, R. Ardiansyah, L. Rusita, I. L. Larasati // IOP Conf. Series: J. Physics: Conf. Series. 1130. – 2018. – 10 pp.
11. Волхонский, А.Е. Методы изготовления прототипов и деталей агрегатов различных изделий промышленности с помощью аддитивных технологий / А.Е. Волхонский, К.В. Дутков // Образовательные технологии. – 2014. – № 1. – С. 127-143.
12. Alami A.H. Using Laminated Metal Tooling (LMT) in Die Manufacturing For Clay Moulding // Proc. 5th Int. Symp. Mechatronics and its Applications, Amman, Jordan, May 27-29, 2008. – 8 pp.
13. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – 2015. – 220 с.
14. Толочко, Н.К. Прямое изготовление металлических деталей с применением LOM-технологии / Н.К. Толочко, А.А. Андрушевич, П.С. Чугаев, Т.А. Богданович // Литье и металлургия. – 2018. – №1. – С. 137-143.
15. Sikder, S. Effect of adaptive slicing on surface integrity in additive manufacturing / S. Sikder, A. Barari, H.A. Kishawy // Proc. ASME 2014 Int. Design Engineering Technical Conf. & Computers and Information in Engineering Conf. IDETC/CIE 2014, august, 17-20, 2014. – Buffalo, New York, USA. – 11 pp.
16. Ahari, H. Laminated injection mould with conformal cooling channels: optimization, fabrication and testing / H. Ahari, A. Khajepour, S. Bedi // J. Machinery Manufacturing and Automation. – 2013. – Vol. 2. – Iss. 2. – P. 16-24.
17. Das, P. Optimum part build orientation in additive manufacturing for minimizing part errors and build time. Master Thesis. USA. Univ. Cincinnati, – 2016. – 60 pp.
18. Taufik, M. Role of build orientation in layered manufacturing: a review / M. Taufik, P. K. Jain // Int. J. Manufacturing Technology and Management. – 2013. – Vol. 27, № 1/2/3. – P. 47-73.
19. Ruan, J. Direct Three-Dimensional Layer Metal Deposition / J. Ruan, L. Tang, F.W. Liou, R.G. Landers // J. Manufacturing Science and Engineering. – 2010. – Vol. 132. – P. 064502-1-064502-6.
20. Alfieri, V. Reduction of surface roughness by means of laser processing over additive manufacturing metal parts / V. Alfieri, P. Argenio, F. Caiazzo, V. Sergi // Materials, 2017. – № 10. – P. 30-42.
21. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review / N. N. Kumbhar, A. V. Mulay // J. Institution of Engineers (India): Series C. – 2018. – Vol. 99. Iss. 4. – P. 481-487.
22. Walczyk, D.F. Recent Developments in Profiled-Edge Lamination Dies for Sheet Metal Forming / D.F. Walczyk, D.E. Harde // Proc. Seventh Solid Freeform Fabrication Symp., Austin, Texas, USA. – 1999. – P. 215-226.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 25.03.2019