

УДК 621.77.04

ПРОБЛЕМА СТУПЕНЧАТОГО РЕЛЬЕФА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ШЕСТЕРЕН ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИСТОВОГО ЛАМИНИРОВАНИЯ

Н.К. Толочко,

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

П.В. Авраменко,

зав. каф. инженерной графики БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В.Б. Кравцов,

ассистент каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ

Д.И. Копчик,

студент агромеханического факультета БГАТУ

В статье обсуждены пути решения проблемы ступенчатого рельефа поверхности при изготовлении различных типов шестерен по аддитивной технологии листового ламинирования. Рассмотрены особенности изготовления металлических цилиндрических прямозубых шестерен с использованием этой технологии, реализуемой по схеме «резка–пакетирование–соединение».

Ключевые слова: металлическая шестерня, ступенчатый рельеф поверхности, аддитивная технология, листовое ламинирование.

The ways of solving the problem of stepped surface relief in manufacturing various types of gears using additive technology of sheet lamination are discussed. The features of manufacturing the metal cylindrical spur gears using this technology realized by «cut–stack–joint» scheme are considered.

Key words: metal gear, stepped surface relief, additive technology, sheet lamination.

Введение

В последние годы аддитивные технологии получают все большее распространение при изготовлении различных изделий. Особенно перспективно с их помощью изготавливать детали машин, в частности, детали для сельскохозяйственной техники [1, 2]. Принципиальным недостатком аддитивных технологий, сдерживающим их широкое применение, является формирование ступенчатого рельефа наклонных и криволинейных поверхностей изделий, что обусловлено присутствием этим технологиям послойным характером построения изделий [3]. Обычно ступенчатый рельеф рассматривается как нежелательное явление, свидетельствующее о низком качестве изготовления изделий.

Традиционно применяют два основных пути решения проблемы ступенчатого рельефа при аддитивном изготовлении изделий [3]. Первый путь состоит в снижении ступенчатого рельефа в процессе аддитивного изготовления изделий за счет уменьшения толщины наносимых слоев строительного материала. Однако это ведет к увеличению количества слоев и, следовательно, к росту продолжительности и себестоимости изготовления изделий. Второй путь состоит в снижении или полном удалении ступенчатого рельефа изготовленных изделий в результате специальной постобработки поверхности: фрезерования,

шлифования, полирования, дробеструйной и пескоструйной обработки, лазерного оплавления и т.п., что также вызывает рост продолжительности и себестоимости изготовления изделий.

Проблема снижения ступенчатого рельефа особенно остро проявляется при изготовлении металлических изделий по аддитивной технологии листового ламинирования (Sheet Lamination, SL), реализуемой по схеме «резка – пакетирование – соединение» («cut – stack – bond», CSB) [4].

Согласно SL-CSB технологии, сначала из металлических листов вырезают выкройки определенной конфигурации с помощью лазера или фрезы, затем эти выкройки пакетируют и соединяют между собой разными способами: стягиванием болтами, склеиванием, пайкой, сваркой. Отличительная особенность SL-CSB технологии состоит в том, что толщина металлических листов, используемых при построении, может быть довольно большой. Например, она может достигать до нескольких миллиметров, в то время как для других схем реализации SL технологии, как, впрочем, и для других видов аддитивных технологий, максимальные толщины наращиваемых слоев материала, как правило, существенно ограничены. Это означает, что в случае использования SL-CSB технологии, имеются принципиальные возможности значительно повысить эффективность изготовления изде-

лий благодаря уменьшению количества слоев и, соответственно, увеличению их толщины [4]. Однако, как отмечалось выше, увеличение толщины слоев ведет к более грубому ступенчатому рельефу поверхности изделий, что обычно считается нежелательным.

Для решения проблемы ступенчатого рельефа при изготовлении изделий по SL-CSB технологии, кроме отмеченных выше двух основных путей, можно выделить, по крайней мере, четыре дополнительных пути.

Первый из них состоит в использовании специальных конструкторско-технологических приемов предотвращения негативного влияния ступенчатого рельефа, обусловленного аддитивным построением, на функциональные свойства изделий. Так, недавно предложен способ, позволяющий предотвращать это влияние с помощью защитных прокладок, однако этот способ пригоден лишь для немногих видов изготавливаемых изделий, в частности, для штамповой оснастки [5].

Особый практический интерес представляют три других пути. Их суть заключается в целенаправленном подборе различных типов изделий, для которых формирование ступенчатого рельефа при изготовлении по SL-CSB технологии 1) может быть в принципе исключено в силу конструктивных особенностей изделий, 2) является допустимым при определенных ограничениях условий эксплуатации изделий, либо 3) является в принципе некритичным, т.е. вполне допустимым, не ухудшающим работу изделий с учетом их основного функционального назначения.

Данная статья посвящена краткому рассмотрению этих трех путей решения проблемы ступенчатого рельефа на примере применения SL-CSB технологии для изготовления металлических шестерен.

Основная часть

Конструктивно-технологические аспекты SL-CSB изготовления шестерен

Проблема ступенчатого рельефа, присущая SL-CSB технологии, может проявляться различным образом в зависимости от типа изготавливаемых шестерен. На рисунке 1 в качестве примера представлены шестерни трех разных конструктивных вариантов: цилиндрическая прямозубая, цилиндрическая косозубая и коническая прямозубая. В верхней части рисунка показан внешний вид шестерен, изготовленных по традиционной технологии металлообработки (шестерни имеют цельную структуру), в нижней части – упрощенные схемы этих же шестерен, изготовленных по SL-CSB технологии (шестерни имеют слоистую структуру). Там же отдельно выделены увеличенные изображения фрагментов шестерен со ступенчатым рельефом.

Рассмотрим особенности конструкции шестерен, обусловленные их изготовлением по SL-CSB технологии.

Цилиндрическая прямозубая шестерня, полученная по SL-CSB технологии (рис. 1 г), состоит из набора одинаковых листовых выкоек, которые по форме совпадают с самой шестерней, отличаясь от нее лишь толщиной h , равной толщине исходного раскраиваемо-

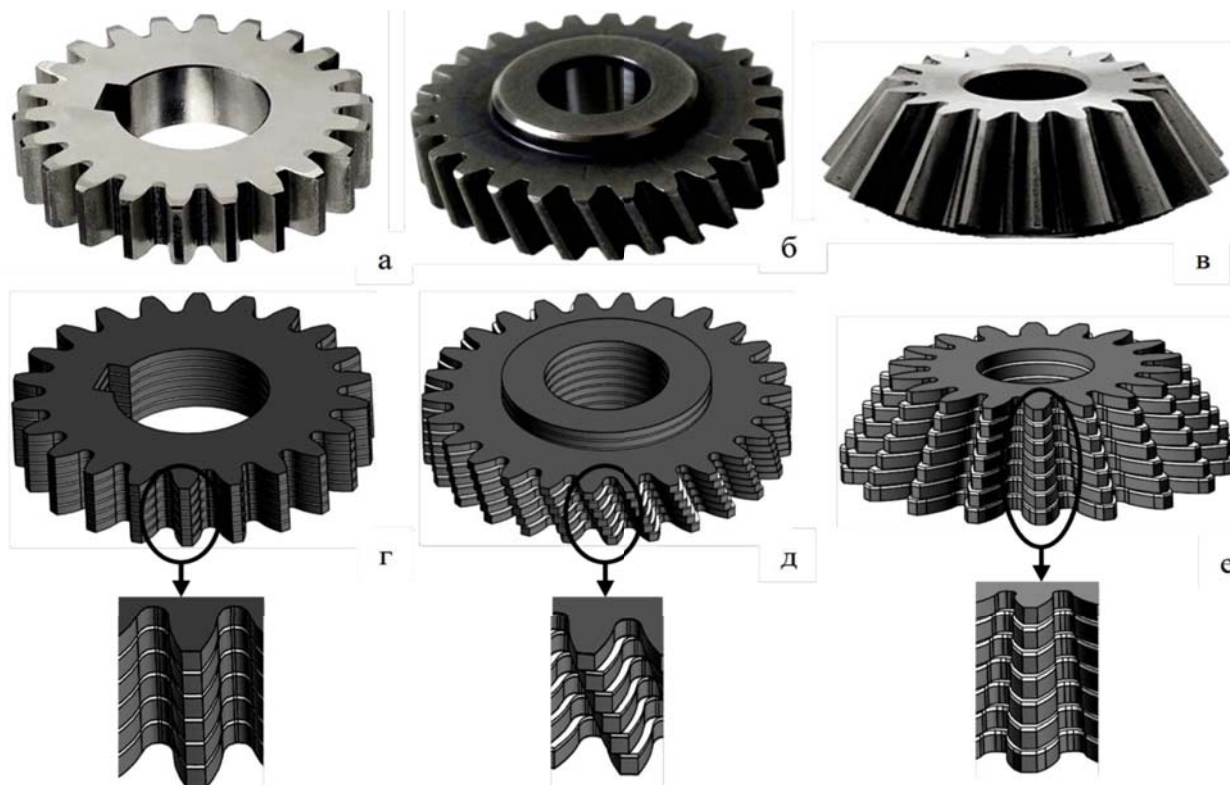


Рисунок 1. Шестерни с цельной (а-в) и слоистой (г-е) структурой; цилиндрическая прямозубая (а, г); цилиндрическая косозубая (б, д); коническая прямозубая (в, е)

го листа металла, что значительно меньше толщины H шестерни. Все выкройки, собранные в пакет, совмещаются друг с другом. При этом зубья полученной таким способом шестерни имеют гладкие рабочие (боковые) поверхности, как и в аналогичной шестерне, полученной по традиционной технологии.

Итак, цилиндрическая прямозубая шестерня, изготовленная по SL-CSB технологии, практически полностью соответствует по геометрическим характеристикам своему традиционному аналогу (рис. 1а). Как следствие, она соответствует ему и по функциональным свойствам, при условии, что обладает требуемой прочностью.

Цилиндрическая косозубая шестерня, полученная по SL-CSB технологии (рис. 1д), состоит из набора листовых выкроек, совпадающих по форме с самой шестерней, как и в случае с рассмотренной выше цилиндрической прямозубой шестерней. В процессе пакетирования смежные выкройки смещаются относительно друг друга, так что каждая очередная выкройка поворачивается вокруг продольной оси на некоторый угол. При этом рабочие поверхности зубьев шестерни, будучи расположенными под углом к плоскости ее основания, приобретают ступенчатый рельеф.

Коническая прямозубая шестерня, полученная по SL-CSB технологии (рис. 1е), состоит из выкроек, подобных по форме самой шестерне, но имеющих разный наружный диаметр, а также разную высоту и толщину зубьев, причем все эти размеры изменяются на определенный шаг. В процессе пакетирования выкройки накладываются друг на друга таким образом, что у каждой следующей выкройки ее диаметр, а также высота и толщина зубьев меньше, чем у предыдущей (нижележащей) выкройки. Кроме того, выкройки совмещаются друг с другом центральными отверстиями, а также другими конструктивными элементами (при их наличии), например, шпоночными

пазами. При этом рабочие поверхности зубьев шестерни, будучи расположенными под углом к плоскости основания шестерни, приобретают ступенчатый рельеф (по аналогии с рассмотренной выше цилиндрической косозубой шестерней). Кроме того, ступенчатый рельеф приобретают вершины зубьев и впадины между зубьями, поскольку они также расположены под углом к плоскости основания шестерни.

Итак, и цилиндрические косозубые шестерни, и конические прямозубые шестерни, полученные по SL-CSB технологии, имеют поверхности со ступенчатым рельефом в отличие от цилиндрических прямозубых шестерен, полученных по этой же технологии. Поэтому вопрос о возможном влиянии ступенчатого рельефа этих двух типов шестерен на их функциональные свойства требует специального рассмотрения.

Ступенчатый рельеф может формироваться на поверхности шестерни по одному из двух вариантов [3]:

1) ступеньки рельефа располагаются в пределах соответствующей CAD-поверхности, определяемой для проектируемой шестерни (рис. 2а, в);

2) за пределами CAD-поверхности (рис. 2б, г).

В первом варианте высота ступенчатого рельефа h_p представляет собой расстояние от CAD-поверхности до вершин внутренних углов ступенек (впадины рельефа), а во втором – расстояние от CAD-поверхности до вершин внешних углов ступенек (выступы рельефа).

В обоих вариантах параметр h_p принимает численное значение, рассчитываемое по формуле:

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

где h – высота ступеньки рельефа, равная толщине листовой выкройки;

α – угол наклона CAD-поверхности к плоскости листовой выкройки (рис. 2) [3].

Надежность шестерен определяется прочностными свойствами зубьев и условиями их нагружения при ра-

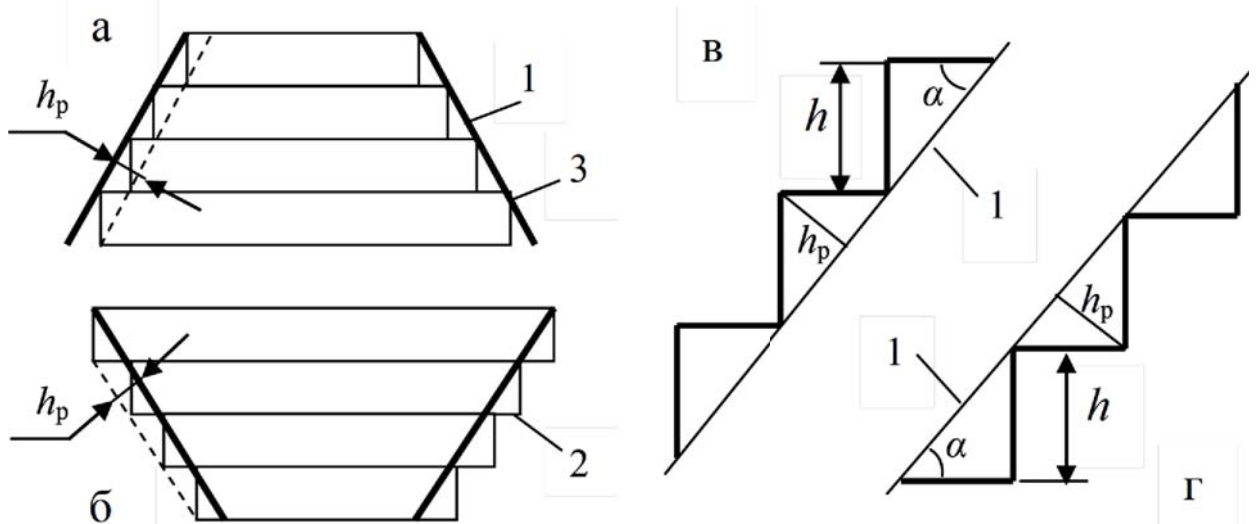


Рисунок 2. Варианты формирования ступенчатого рельефа на поверхности шестерни: вариант 1 (а, в) и вариант 2 (б, г); 1 – CAD-поверхность спроектированной шестерни; 2 – ступенчатый рельеф изготовленной шестерни; 3 – листовые выкройки (наращиваемые слои)

боте зубчатой передачи. Основные нагрузки воспринимает рабочая поверхность зубьев, которая может подвергаться различным повреждениям: изнашиванию, выкрашиванию и др. [6]. Возникновению этих повреждений способствует повышение контактного давления, которое резко возрастает при наличии неровностей на рабочей поверхности зубьев. Ярким проявлением таких неровностей является ступенчатый рельеф, который формируется на рабочей поверхности зубьев цилиндрических косозубых шестерен и конических прямозубых шестерен при их изготовлении по SL-CSB технологии. Данное обстоятельство накладывает ограничения на применение таких шестерен, которые, по-видимому, могут работать в основном в неотчетственных, слабонагруженных зубчатых передачах.

По-иному встает вопрос о роли ступенчатого рельефа, который формируется при изготовлении конических прямозубых шестерен по SL-CSB технологии, но не на рабочей поверхности зубьев (как это рассматривалось выше), а на вершинах зубьев и во впадинах между зубьями.

В отличие от рабочей поверхности зубьев, которая при работе зубчатой передачи может подвергаться значительным силовым нагрузкам, вызывающим разрушение зубьев, на вершинах зубьев и во впадинах между зубьями эти нагрузки могут быть в принципе не критичными. Это связано с наличием радиального зазора в зубчатой передаче, величина которого обычно задается при проектировании зубчатой передачи и соответствует расстоянию между окружностью вершин зубьев одной конической шестерни и окружностью впадин, сопряженной с ней другой конической шестерни [7]. Очевидно, что, проектируя зубчатую передачу с использованием конических шестерен, изготовленных по SL-CSB технологии, следует учитывать возможные соотношения между величиной радиального зазора и высотой ступенчатого рельефа на вершинах зубьев и во впадинах между зубьями.

При необходимости, с учетом требований, предъявляемых к конструкции, и условиям эксплуатации шестерен, изготовленных по SL-CSB технологии, высота ступенчатого рельефа может быть

уменьшена согласно выражению (1) за счет использования выкроек, вырезанных из более тонких листовых металлов. Также ступенчатый рельеф может быть сглажен или полностью удален с помощью различных способов постобработки поверхности, о чем упоминалось выше.

Особенности SL-CSB изготовления металлических цилиндрических прямозубых шестерен

Методика изготовления шестерен была следующей. Листовой металл (сталь Ст3) с толщиной листа $h_1 = 2$ мм и $h_2 = 0,5$ мм подвергали контурному раскрою с помощью лазерного станка Laser CUT-1515-6-2-N-RT (ООО «Рухсервомотор», РБ), в результате чего получали комплекты выкроек в форме шестерен соответствующей толщины (рис. 2). Выкройки пакетировали и соединяли между собой с помощью клея «Конект». Таким способом получали цилиндрические прямозубые шестерни, составленные из толстых, либо тонких выкроек.

На рисунке 3 в качестве примера показаны полученные лазером листовые выкройки для изготовления шестерен с разным по форме профилем зубьев (толщина листа $h = 2$ мм, диаметр вершин зубьев $d_a = 60$ мм).

На рисунке 4 показаны образцы листовых выкроек разной толщины и изготовленные из них шестерни с эвольвентным профилем зубьев (толщина листа $h_1 = 2$ мм и $h_2 = 0,5$ мм, диаметр вершин зубьев $d_a = 50$ мм).

Измерения толщины полученных шестерен каждого вида $H_{к1}$ и $H_{к2}$ показали, что она больше суммарной толщины составляющих их выкроек:

$$H_{к1} > H_1 \text{ и } H_{к2} > H_2,$$

$$\text{где } H_1 = n_1 h_1 \text{ и } H_2 = n_2 h_2;$$

n_1 и n_2 – количество выкроек в шестернях каждого вида.

Увеличение толщины пакета выкроек после их склеивания обусловлено наличием клеевых прослоек между выкройками, толщину которых можно определить по формуле:

$$h_k = \frac{H_k - H}{n - 1},$$

используя данные, представленные в табл. 1.

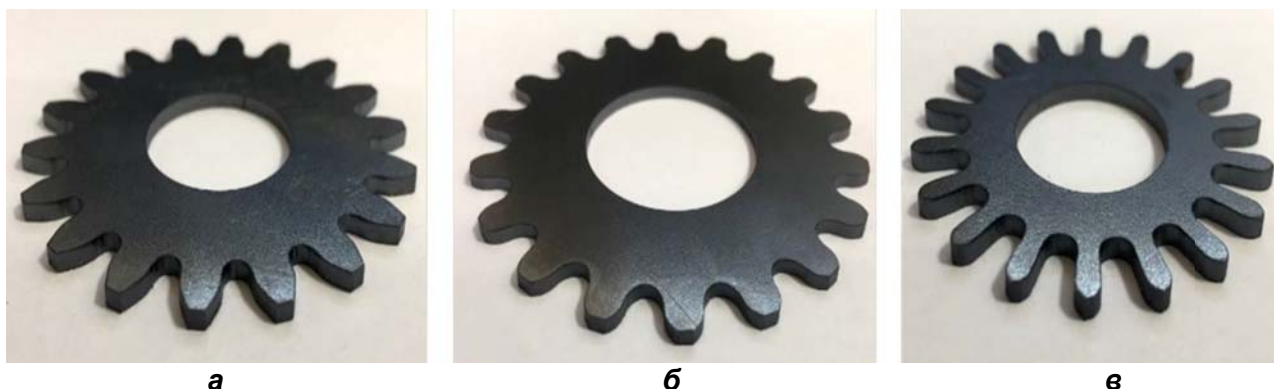


Рисунок 3. Листовые выкройки из стали Ст3 для изготовления шестерен с разным по форме профилем зубьев: эвольвентным (а); круговым (б); циклоидальным (в)
Толщина листа – 2 мм. Наружный диаметр шестерен – 60 мм.

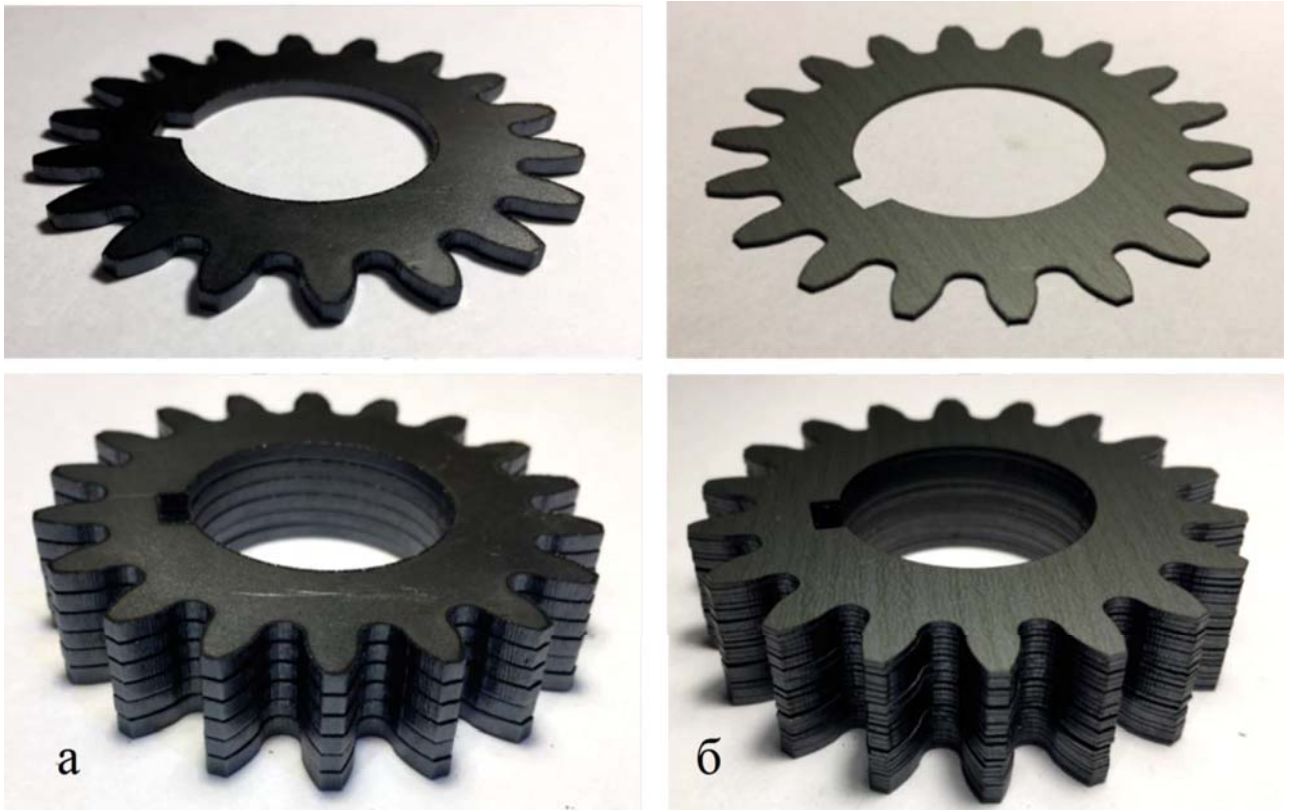


Рисунок 4. Листовые выкройки и изготовленные из них шестерни. Толщина листа (h) и количество выкроек (n): $h_1 = 2$ мм и $n_1 = 6$ шт. (а); $h_2 = 0,5$ мм и $n_2 = 24$ шт. (б). Наружный диаметр шестерен – 50 мм

Таблица 1. Данные для расчета толщины клеевых прослоек h_k

h_1 , мм	n_1 , шт.	H_1 , мм	H_{k1} , мм	h_2 , мм	n_2 , шт.	H_2 , мм	H_{k2} , мм
0,5	24	12	13,2	2,0	6	12	12,25

Как показали вычисления, $h_k \approx 0,05$ мм для обоих видов шестерен. Указанная толщина клеевых прослоек является типичной при создании многослойных структур с использованием разных видов клеев [8, 9]. В частности, с помощью SL-технологии изготавливали изделия из стальных листов толщиной 0,12 мм, которые пакетировали и соединяли двухсторонней клеевой пленкой марки Scotch 3М 467MP, толщиной 50 мкм [10, 11]. Толщину клеевых прослоек следует учитывать при проектировании шестерен, получаемых по SL-CSB технологии.

Заключение

Традиционные технологии изготовления шестерен являются довольно сложными и дорогостоящими, для их реализации требуются специальные зуборезные станки и инструменты. Поэтому в последние годы все больше внимания уделяется изготовлению полимерных и металлических шестерен с помощью различных аддитивных технологий: Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography Apparatus (SLA), Multi-Jet Modeling (MJM), Binder Jetting (BJ), Selective Laser Sintering (SLS), Electron beam melting (EBM) [12]. Среди них особое место занимает SL-CSB тех-

нология, которая является одной из немногих аддитивных технологий, позволяющих создавать изделия непосредственно из металла, и к тому же характеризуется сравнительно высокой экономической эффективностью, благодаря тому, что изделия создаются путем последовательного наращивания готовых слоев металла требуемой конфигурации [4].

Вместе с тем SL-CSB технология пока еще далека от своего совершенства, из-за чего сдерживается ее применение для изготовления широкого круга металлических изделий различного назначения.

В данной статье на примере изготовления шестерен были рассмотрены некоторые возможные пути решения проблемы ступенчатого рельефа, формирующегося при изготовлении изделий по данной технологии. Для окончательного решения этой проблемы требуются дополнительные исследования.

К другим проблемам, связанным с дальнейшим развитием SL-CSB технологии и требующим первоочередного решения, относятся:

- автоматизация работ по пакетированию и соединению между собой листовых выкроек;
- повышение надежности клеевых (или других) соединений листовых выкроек с учетом условий экс-

плуатации, прежде всего, повышение их механической прочности;

– совершенствование конструкции изделий на этапе проектирования, в частности, на основе методов топологической оптимизации, с учетом уникальных возможностей реализации этих конструкции, которые предоставляет аддитивное производство изделий [2].

Очевидно, что SL-CSB технология не может полностью заменить традиционные технологии изготовления изделий. Поэтому ее, как, впрочем, и другие аддитивные технологии, наиболее эффективно использовать в сочетании с традиционными технологиями. Так, в рассмотренном в данной статье случае изготовления шестерен, наряду с SL-CSB технологией, обеспечивающей создание тела шестерни, могут быть задействованы известные технологии снятия фасок с зубьев шестерни [13].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Толочко, Н.К. Аддитивное производство деталей сельскохозяйственных машин / Н.К. Толочко, Н.Н. Романюк, П.В. Авраменко, О.В. Сокол // Исследования, результаты (Алматы). – 2020. – № 4. – С. 335-344.
2. Проектирование и аддитивное производство деталей машин / Н.К. Толочко [и др.] // Агропанорама. – 2020. – №4. – С. 2-7.
3. Толочко, Н.К. Аддитивные технологии: проблема ступенчатого рельефа поверхности / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // Агропанорама. – 2019. – № 2. – С. 12-16.
4. Толочко, Н.К. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // Вестник машиностроения. – 2020. – № 10. – С.11-15.
5. Штмп для листовой штамповки: пат. ВУ 23392 / Н. К. Толочко, Н.Н. Романюк, О.В. Сокол. – Опубл. 28.02.2021.
6. Колеса зубчатые. Виды повреждений. Классификация и описание: ГОСТ РБ 31381-2009. – Введ. 25.06.2009. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь. – 72 с.
7. Передачи зубчатые конические. Термины, определения и обозначения: ГОСТ 19325-1973. – Введ. 01.01.1975. – Москва: Изд-во стандартов, 1992 – 89 с.
8. Kultz, M. An experimental study on the bending response of multi-layered fibre-metal-laminates / M. Kultz [et al] // J. Composite Materials. – 2019. – Vol. 53. – P. 2579-2591.
9. Nia, A.B. Failure of Glass Fibre-Reinforced Polypropylene Metal Laminate Subjected to Close-Range Metal Explosion / A.B. Nia [et al] // Polymers. – 2020. – Vol. 12. – Iss. 9. – 14 pp.
10. Zak, G. Adhesive Bonding of Sheet for Laminated Metal Tooling / G. Zak, W. Wang // Proc. Solid Freeform Fabrication Symp., Austin, Texas, USA, 2002. – P. 502-509.
11. 3M™ 467MP Клеепереносная лента, прозрачная, 610 мм x 55 м. [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: https://www.3m.com.by/3M/ru_BY/p/d/v000192506/. – Дата доступа: 12.12.2021.
12. 3D печать шестеренок: перспективный процесс и альтернатива сервисному обслуживанию механизмов [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <https://3dlbl.ru/stati/3d-pechat-shesterenok/>. – Дата доступа: 19.12.2021.
13. Кондрашов, А.Г. Повышение качества обработки фасок на торцах зубьев зубчатых колес на основе проектирования зубофасочного инструмента: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / А.Г. Кондрашев; Камская государственная инженерно-экономическая академия (ИНЭКА). – Набережные Челны, 2008. – 23 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 17.01.2022

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 1-е полугодие 2022 года: для индивидуальных подписчиков - 34,92 руб., ведомственная подписка - 36,72 руб.