

П. В. Авраменко¹, В. Б. Кравцов¹, А. С. Милькевич²

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: pavel.auramenka@bsatu.by

²ОАО «Минский завод шестерен»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: kb_norno@mgw.by

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИСТОВОГО ЛАМИНИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРЯМОЗУБЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС (ШЕСТЕРЕН)

Аннотация. Представлены результаты исследования эффективности применения аддитивной технологии листового ламинирования при производстве цилиндрических прямозубых зубчатых колес.

Ключевые слова: аддитивные технологии, листовое ламинирование, зубчатое колесо, шестерня.

P. V. Auramenka¹, V. B. Krautsou¹, A. S. Milkevich²

¹EI “Belarusian State Agrarian Technical University”

Minsk, Republic of Belarus
E-mail: pavel.auramenka@bsatu.by

²JSC Minsk Gear Plant,
Minsk, Republic of Belarus,
E-mail: kb_norno@mgw.by

APPLICATION OF ADDITIVE SHEETING TECHNOLOGY LAMINATING TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF CYLINDRICAL SPUR GEARS (PINIONS)

Abstract. The results of the study of the effectiveness of additive sheet lamination technology in the production of spur gears are presented.

Keywords: additive technologies, sheet lamination, gear wheel, pole gear.

Введение

Современные аддитивные технологии (АТ) получают все большее распространение при изготовлении различных деталей машин из металла [1, 2].

Одной из разновидностей АТ является технология листового ламинирования металла Metal Sheet Lamination (MSL/SL), в частности ее вариант: «раскрой-пакетирование-соединение» («cut-stack-bond», (CSB)), реализация которой осуществляется без применения специальных дорогостоящих 3D-принтеров. При этом основным применяемым оборудованием являются лазерные или фрезерные станки, с помощью которых выполняется контурный раскрой металлических листов. Это оборудование имеется на многих промышленных предприятиях, которые обычно оказывают услуги по контурному раскрою по вполне приемлемым ценам. Металлические листы легкодоступны, а их цена обычно не превышает нескольких долл. США за 1 кг, т. е. они гораздо дешевле, чем металлические порошки или проволоки, применяемые в других видах АТ-технологий прямого изготовления изделий из металла [3, 4].

Целью работы является оценка работоспособности аддитивной технологии листового ламинирования при производстве цилиндрических прямозубых зубчатых колес (шестерен) с использованием метода конечных элементов пакета АРМ FEM CAD-системы КОМПАС-3D.

Основная часть

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

В отличие от цельноструктурной (рис. 1, *a*), цилиндрическая прямозубая шестерня, полученная по SL-CSB технологии (рис. 1, *б*), состоит из набора одинаковых листовых выкроек, которые совпадают по форме. Все выкройки, собранные в пакет, совмещаются друг с другом. При этом зубья в полученной таким способом шестерне благодаря шлифовальной обработке имеют гладкие рабочие (боковые) поверхности, как и в аналогичной шестерне, полученной по традиционной технологии (рис. 1, *a*).

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

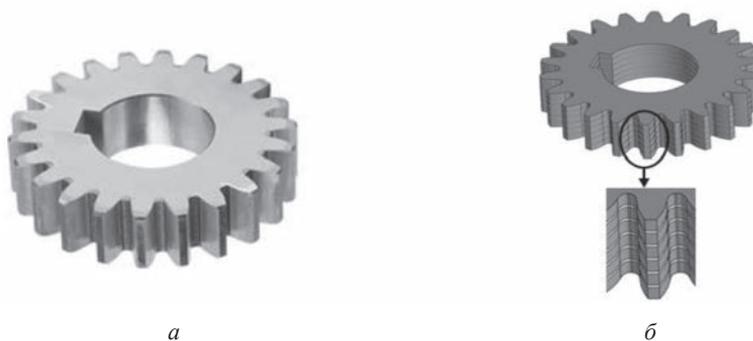


Рис. 1. Цилиндрические прямозубые шестерни: *a* – с цельной структурой; *б* со слоистой структурой

С целью разработки и испытания конструкции цилиндрической зубчатой шестерни, изготовленной по аддитивной технологии листового ламинирования, была выбрана сменная шестерня с гитары механизма деления зубофрезерного вертикального полуавтомата 5E32.

Далее согласно специально разработанной методике листовый металл (Сталь 65Г) с толщиной листа 5 мм подвергали контурному раскрою с помощью лазерного станка LaserCUT-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 «Копект». Таким способом получали цилиндрические прямозубые шестерни, составленные из листовых выкроек (рис. 3).



Рис. 2. Листовая выкройка цилиндрической шестерни



Рис. 3. Цилиндрическая шестерня из листовых выкроек

Изготовление шестерни путем раскроя и соединения листовых выкроек клеевым соединением выявило следующие недостатки: в частности, увеличивается толщина изготавливаемой шестерни, т. е. толщину клеевых прослоек следует учитывать при проектировании шестерен, получаемых по SL-CSB технологии, кроме того, увеличивается стоимость изготовления и замедляется процесс

сборки готовой шестерни за счет увеличения количества технологических операций, времени за-
сыхания клея и дополнительной обработки изготовленной шестерни от клея.

Для проведения испытаний шестерни было предложено использовать вместо клеевого соеди-
нения резьбовое. Соответственно для изготовления шестерни была подготовлена конструкторская
документация, в частности, сборочный чертеж (рис. 4), согласно которому в листовых выкройках
дополнительно выполнялись отверстия, где далее нарезалась метрическая резьба и вставлялись
крепежные винты.

Далее был проведен прочностной расчет с использованием метода конечных элементов и па-
кета АРМ FEM CAD-системы КОМПАС-3D [5]: создание и подготовка 3D-модели, задание гра-
ничных условий (закрепление и силовое нагружение), генерация конечно-элементной сетки на
3D-модели, проведение расчета и анализ полученных данных.

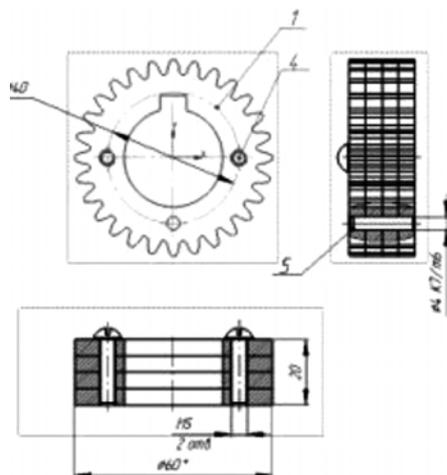


Рис. 4. Проект цилиндрической шестерни, изготовленной из листовых выкроек с резьбовым соединением

Для подготовки к расчетам была спроектирована и использована 3D-модель выкройки шестер-
ни (рис. 5), на основании которой была создана 3D-модель шестерни в сборе (рис. 6).

Далее перед генерацией конечно-элементной сетки на 3D-модели были заданы закрепления и
максимально возможные нагрузки.

Для закрепления использовался шпоночный паз (рис. 7).

В соответствии с особенностями внешних воздействий и условий функционирования для за-
дания максимально возможных нагрузок на шестерню были приняты значения, соответствующие
паспорту станка, в частности, согласно технической документации на зубофрезерный вертикаль-
ный полуавтомат 5Е32 принята для расчетов $F_{t,max} = 1000\text{Н}$.



Рис. 5. 3D-модель листовой выкройки цилиндрической шестерни

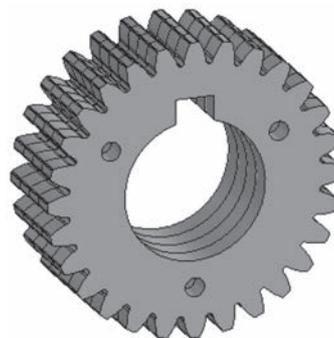


Рис. 6. 3D-модель цилиндрической шестерни в сборе

Далее был проведен прочностной расчет, результаты которого представлены на рис. 8.

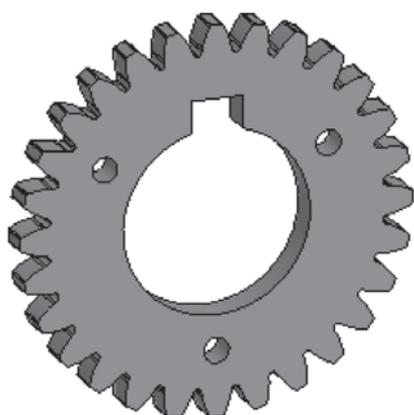


Рис. 7. Схема закреплений и силового воздействия на шестерню

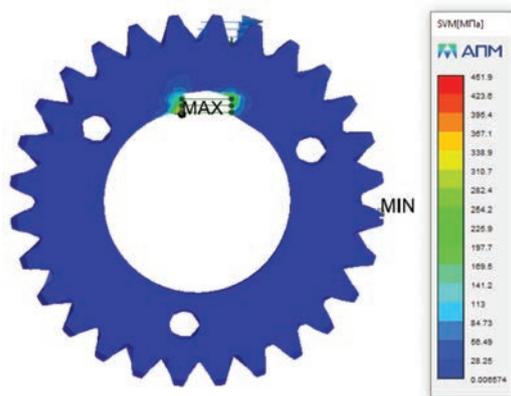


Рис. 8. Диаграммы распределения эквивалентных напряжений по фон Мизесу SVM(МПа) в шестерне под нагрузкой

На рис. 8 представлены поля распределения эквивалентных напряжений по фон Мизесу SVM(МПа) в исследуемой шестерне; визуально, по цвету, определяется величина напряжений, возникающих в конструкции под действием внешних сил, красным цветом – максимальное значение, синим – минимальное; нулевые или изотропные зоны также окрашены в синий цвет.

Анализ эквивалентных напряжений, представленных на рис. 8, показывает, что при нагрузках, действующих в процессе работы шестерни, коэффициент запаса прочности выше допустимого минимального показателя в значении $K_{зап,мин}=1,5$ [6; 7, с. 42]. Кроме того, на основании расчета и анализа полученных данных выявлены наименее нагруженные участки конструкции шестерни, что позволяет провести дальнейшую модификацию ее конструкции с целью снижения металлоемкости.

На основании полученных результатов моделирования на лазерном станке произвели раскрой листового металла Сталь 65Г толщиной 5 мм для получения выкроек шестерни (рис. 9). Далее для устранения облоя проводилась плоскошлифовальная операция и сбор шестерни из выкроек с винтовой фиксацией (рис. 10).

Дополнительно проводили термическую обработку полученной шестерни для получения твердости материала в пределах 38–42 HRC, а также зубошлифовальную операцию на шлицешлифовальном станке с ЧПУ В3-729Ф4-02.



Рис. 9. Полученные выкройки шестерни после лазерной и шлифовальной операций



Рис. 10. Шестерня в сборе

Испытания работоспособности предложенной шестерни (без проведения стендовых испытаний), изготовленной по аддитивной технологии листового ламинирования проводились на зубофрезерном станке 5Е32 (рис. 11). При проведении испытаний, после форсированного режима нагружения, осмотр не выявил признаков повреждений.



Рис. 11. Сменная цилиндрическая шестерня, установленная в механизм деления зубофрезерного вертикального полуавтомата 5E32

Для проведения модификации конструкции шестерни с целью снижения ее металлоемкости при сохранении прочностных характеристик были использованы полученные диаграммы распределения полей напряжения (рис. 8). Учитывая технологические ограничения, уменьшение металлоемкости конструкции возможно только с внесением дополнительных отверстий в структуру шестерни. Учитывая сплошность поверхности шестерни на данном этапе исследований по снижению металлоемкости конструкции, допустили применение сквозных отверстий.

Для подготовки к расчетам была спроектирована и использована облегченная 3D-модель выкройки шестерни с дополнительными отверстиями, снижающими ее металлоемкость (рис. 12). Диаметр отверстий подбирался экспериментально, в соответствии с диаграммой распределения полей напряжений

(рис. 8). Далее была создана 3D-модель шестерни в сборе (рис. 13) и заданы граничные условия с указанием закреплений и максимально возможных нагрузок (рис. 14).

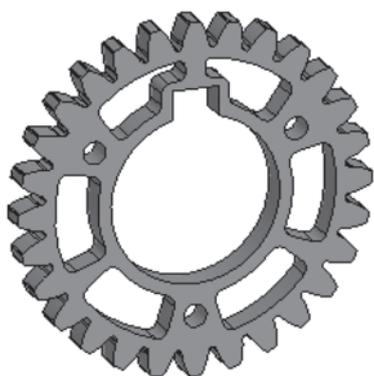


Рис. 12. 3D-модель листовой выкройки цилиндрической прямозубой шестерни



Рис. 13. 3D-модель цилиндрической прямозубой шестерни в сборе

Анализ эквивалентных напряжений, представленных на рис. 15, показывает, что при нагрузках, действующих в процессе работы шестерни, коэффициент запаса прочности превышает допустимый показатель в значении $K_{зап} = 1,5$.

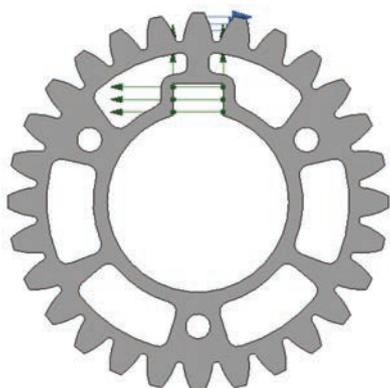


Рис. 14. Схема закреплений и силового воздействия на шестерню

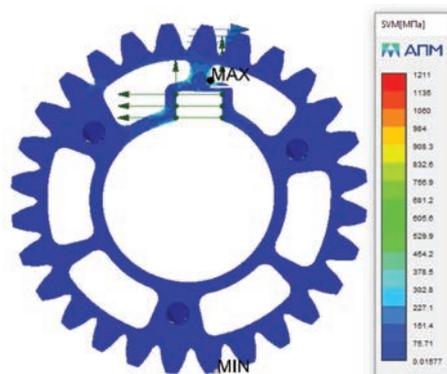


Рис. 15. Диаграммы распределения эквивалентных напряжений по фон Мизесу SVM(МПа) в шестерне под нагрузкой

В рамках совместных работ по научно-техническому сотрудничеству специалистов Минского завода шестерен и Белорусского государственного аграрного технического университета разработанный технологический процесс листового ламинирования цилиндрических прямозубых шестерен позволяет заменить базовые операции на одну операцию лазерной резки, что, в свою очередь, повышает точность, а также снижает длительность и стоимость изготовления. Вместе с тем, что немаловажно, обеспечивается снижение металлоемкости детали при сохранении требуемых прочностных свойств.

На рис. 16 представлен изготовленный с помощью технологии листового ламинирования образец облегченной выкройки цилиндрической прямозубой шестерни. Данная конструкция предусматривает снижение металлоемкости и, соответственно, массы шестерни на 36,9 % за счет выполнения дополнительных отверстий (исходная масса шестерни – 0,274 кг, облегченная масса шестерни – 0,173 кг).

Предварительные испытания дают основания полагать, что такие зубчатые колеса могут быть использованы для отдельных передач в общем машиностроении и за счет этого может быть достигнуто снижение веса передачи. Для более конкретных рекомендаций необходимы дополнительные исследования.

Заключение

В данной статье на примере изготовления цилиндрических прямозубых шестерен были рассмотрены некоторые возможные пути решения применения аддитивной технологии листового ламинирования, в частности для снижения себестоимости производства единичных образцов (при проведении ремонтных работ и испытаний), а также снижения металлоемкости шестерен с использованием метода конечных элементов пакета APM FEM CAD-системы КОМПАС-3D.

В результате проведенного моделирования и анализа напряженно-деформированного состояния шестерен с помощью приложения конечно-элементного анализа APM FEM CAD-системы КОМПАС-3D, позволяющего учитывать особенности конструкции детали, получены изображения полей напряжений в трехмерной модели шестерни, на основании которых была разработана ее конструкция с уменьшенной металлоемкостью.

Результаты были использованы при создании новой конструкции цилиндрической прямозубой шестерни, по которому созданы опытные образцы для проведения испытаний. Масса новой конструкции шестерни на 36,9 % ниже исходной.

Список использованных источников

1. Аддитивное производство деталей сельскохозяйственных машин / Н. К. Толочко [и др.] // 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. Проблема ступенчатого рельефа при изготовлении шестерен по аддитивной технологии листового ламинирования / Н. К. Толочко [и др.] // Агропанорама. – 2022. – № 1. – С. 2–7.
5. Система прочностного анализа APM FEM для КОМПАС-3D. [Электронный ресурс] // НТЦ «АПМ». – Режим доступа: <https://arm.ru/arm-fem>. – Дата доступа: 03.05.2023.
6. ГОСТ 27609-88. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Основные положения и требования к проведению и нормативно-техническому обеспечению. – М.: Стандартинформ, 1989. – 13 с.
7. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.



Рис. 16. 3D-модель листового выкройки цилиндрической шестерни