

19. ГОСТ 20793-2023. Тракторы и машины сельскохозяйственные. Техническое обслуживание. ФГБУ «Институт стандартизации». – М., 17.05 2023 г.

Summary. Experienced specialists in the field of technical service of MTP should conduct more research on farms both to study best practices and to improve their quality, especially on a large scale (in the region, in the Republic as a whole). The above material does not reveal new knowledge, but the laws of the universe and mechanochemical friction and wear (according to B.I. Kostetsky) have not changed and the task is to use them effectively.

УДК 621.77.04

Толочко Н.К., доктор физико-математических наук, профессор;

Кравцов В.Б., старший преподаватель;

Астрейко К.Ю., магистрант

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

АДДИТИВНОЕ ЛИСТОВОЕ ЛАМИНИРОВАНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Аннотация. Предложены конструкторско-технологические подходы к изготовлению стальных деталей машин (шестерня и грядиль плуга) методом аддитивного листового ламинирования в заводских условиях. Детали с многослойной структурой прошли топологическую оптимизацию и испытания, которые показали возможность снижения их массы при сохранении требуемых функциональных свойств, а также повышения производительности и снижения затрат на производство.

Abstract. Design and technological approaches for manufacturing steel machine components (a gear and a plough beam) by means of sheet lamination additive technology under factory conditions are proposed. The multilayer structured components were subjected to topology optimization and testing, which demonstrated the potential to reduce their mass while preserving required functional properties, as well as to increase productivity and lower production costs.

Ключевые слова. Шестерня, грядиль, конструкция, изготовление, аддитивная технология, листовое ламинирование

Key words. Gear, beam, design, manufacturing, additive technology, sheet lamination.

Аддитивные технологии (АМ, от англ. Additive Manufacturing) находят широкое применение в машиностроении для изготовления деталей, особенно те из них, которые позволяют формировать изделия непосредственно из металла [1]. Наибольшую практическую значимость имеют технологии, основанные на селективной термообработке лазерным (Selective Laser Melting, Laser Metal Deposition) или электронным лучом (Electron Beam Melting, Electron Beam Freeform Fabrication)

металлического порошка или проволоки, а также плазмой (Ion Fusion Formation) или электродуговым разрядом (Gas metal arc welding). Однако распространение этих технологий ограничено высокой стоимостью оборудования, малой рабочей зоной построения и низкой производительностью, обусловленной послойным и локальным характером формирования изделий.

Принципиально иным подходом является аддитивная технология листового ламинирования (Sheet Lamination, SL), при которой детали формируются из листового металла. Наибольшую эффективность демонстрирует CSB-SL-вариант («cut–stack–bond»), предусматривающий контурный раскрой, пакетирование и последующее их соединение между собой. Достоинствами данной технологии являются доступность оборудования (раскроечные станки), большая рабочая зона (до 2 метров и более) и высокая производительность, поскольку изготавливаемая деталь наращивается сразу же готовыми слоями – листовыми выкройками [2].

В настоящей работе рассмотрены возможности применения SL-технологии для изготовления стальных шестерен и грядилей плуга на Минском заводе шестерен (МЗШ). Разработаны комбинированные технологические процессы, совмещающие традиционные операции и SL-технологии. Применение SL-подхода расширяет конструктивно-технологические возможности проектирования, позволяя оптимизировать детали под конкретные условия эксплуатации. В частности, в работе реализована топологическая оптимизация конструкции шестерни и грядиля с учётом особенностей их послойного изготовления. Работа структурно состоит из двух разделов: первый посвящён шестерне, второй – грядилю.

Проектирование и производство шестерен

Шестерни являются ключевыми элементами зубчатых передач, широко используемых в различных типах машин. При их изготовлении по технологии листового ламинирования (SL) особое внимание требуется уделить проблеме нежелательного формирования ступенчатого рельефа на боковых стенках разных типов шестерен с учетом их характерной геометрии [2]. Такой рельеф формируется при условии, когда боковые стенки шестерен расположены под углом к направлению аддитивного построения, т.е. к плоскости наращиваемых листовых выкроек. Особенно это характерно для цилиндрических косозубых и конических прямозубых шестерен. В отличие от них, у цилиндрических прямозубых шестерен боковые поверхности ориентированы параллельно направлению аддитивного построения, что позволяет избежать указанной проблемы.

С учетом этих факторов в качестве объекта конструкторско-технологической разработки была выбрана цилиндрическая прямозубая

шестерня, установленная в гитаре механизма деления зубофрезерного станка 5Е32. Материал шестерни – сталь 65Г.

Традиционный технологический процесс изготовления шестерни в заводских условиях включал следующие операции: (1) заготовительная, (2) термообработка (нормализация), (3) токарная, (4) термообработка (нормализация), (5) зубофрезерная, (6) долбежная, (7) слесарная, (8) термообработка (закалка), (9) плоскошлифовальная, (10) шлифовальная (шлифовать отверстие Ø30), (11) шлифовальная (шлифовать поверхность Ø60), (12) зубошлифовальная, (13) контрольная. Общая трудоёмкость процесса составила около 9,5 часов (табл. 1).

Таблица 1 – Трудоёмкость (Т) операций традиционного технологического процесса изготовления шестерни

Операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Т, мин	6	25	32,4	25	75	12	3	240	6	14	10	93	16

Операции механической обработки в традиционном технологическом процессе выполнялись на следующих станках: ленточно-отрезном, токарно-винторезном, зубофрезерном, долбежном, плоскошлифовальном, внутришлифовальном и шлицешлифовальном. Термообработка (нормализация) проводилась в камерной печи, закалка – в индукционной.

Заготовку шестерни получили путем отрезки стального проката с последующей токарной обработкой. Зубья формировались зубофрезерованием, шпоночный паз – долблением. Слесарные операции обеспечивали снятие заусенцев, а шлифование – достижение требуемого качества поверхностей. Финальный контроль обеспечивал соответствие геометрических параметров чертежу.

При применении SL-технологии претерпели модифицирование, как конструкция шестерни, так и технологический процесс ее изготовления. Конструкция приобрела послойную (многослойную) форму: каждый слой представлял собой индивидуальную листовую выкройку. Это повлияло на структуру всего производственного процесса – как в части операций, так и условий их выполнения.

Модифицированный технологический процесс изготовления включал следующие операции: (1) заготовительная, (2) слесарная, (3) термообработка (закалка), (4) плоскошлифовальная, (5) контрольная, (6) слесарно-сборочная, (7) шлифовальная (шлифовать отверстие Ø30), (8) шлифовальная (шлифовать поверхность Ø60), (9) зубошлифовальная, (10) контрольная. Согласно табл. 2, трудоёмкость изготовления по SL-технологии составила около 6,5 часов, что значительно ниже по сравнению с традиционным процессом.

Таблица 2 – Трудоёмкость (Т) операций модифицированного технологического процесса изготовления шестерни

Операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Т, мин	6	2	240	7	5	5	14	10	93	11

Внедрение SL-технологии привело к существенным изменениям в структуре технологического процесса изготовления шестерни. Из него были исключены такие операции, как термообработка (нормализация), токарная, зубофрезерная и долбежная обработка. В модифицированный процесс добавлены новые – промежуточный контроль и слесарно-сборочная операция. В ряде операций, сохранившихся в модифицированном процессе, были изменены их содержание и условия выполнения (например, заготовительная, слесарная, термообработка, шлифование и контроль). Это повлекло за собой изменение последовательности операций и их нумерации.

В соответствии с SL-технологией заготовки выполнены в виде листовых выкроек из горячекатаной стали 65Г толщиной 5 мм, каждая из которых соответствовала геометрии шестерни (рис. 1а). Для получения выкроек использовали станок лазерной резки LaserCUT-1515-6-2-N-RT (мощность 2000 Вт), в качестве газа для лазерной резки применяли кислород, что обеспечила высокую скорость резания. Для изготовления шестерни толщиной 20 мм требовалось 4 одинаковые выкройки. На стадии резки одновременно формировались контур зубчатого венца (с припуском на механообработку), центральное отверстие со шпоночным пазом и три дополнительных (для механического соединения пакетированных выкроек между собой). Режимы резки были подобраны с учётом материала (табл. 3).

Таблица 3 – Показатели основных параметров реза сального листа из стали 65Г, толщиной 5 мм.

Скорость реза, мм/мин	2500
Давление газа при резке, МПа	30
Диаметр сопла, мм	1,5
Фокус, мм	+3
Мощность луча, Вт	2000
Ширина реза, мм	0,5

На слесарной операции в трех дополнительных отверстиях выкроек нарезали резьбу для последующего стяжения болтами. Операцию выполняли на всех выкройках в сборе: заготовки устанавливали на оправку и фиксировали струбциной. Кроме того, в каждой выкройке сверлили два отверстия под установочные штифты. Для достижения требуемой твердости (43–46 HRC) листовые выкройки подвергали закалке. На этапе промежуточного контроля оценивали качество поверхности перед финальной сборкой, осуществляемой в рамках слесарно-сборочной операции. На этом этапе выкройки пакетировали, соединяли болтами и фиксировали штифтами, формируя заготовку шестерни.

На последующих шлифовальных операциях обрабатывали рабочие поверхности собранной шестерни, включая боковые, вершины и впадины

зубьев. Особое внимание уделяли устранению неровностей, образующихся на стыках фрагментов до шлифования (рис. 1, б). В результате шлифования рабочие поверхности зубьев приобретали необходимую шероховатость, сопоставимую с качеством зубьев, изготовленных традиционными методами (рис. 1, в).



Рисунок 1 – Листовая выкройка (а) и многослойная шестерня до (б) и после (в) шлифования зубьев

Переход от традиционной технологии изготовления шестерни к модифицированной, основанной на SL-технологии, позволил сократить общую трудоёмкость с 9,5 до 6,5 часа, что обеспечило рост производительности примерно в 1,5 раза. Согласно экономическим расчётам, себестоимость снизилась примерно на 5 % за счёт уменьшения числа операций, в том числе высокоэнерго- и трудоёмких.

Одним из направлений совершенствования конструкции стала задача снижения металлоёмкости. Для этого методом конечных элементов в APM FEM (CAD-система КОМПАС-3D) было исследовано напряжённо-деформированное состояние 3D-модели шестерни. На основе анализа распределения полей напряжений предложена топологическая оптимизация – добавление сквозных отверстий в наименее нагруженных участках.

Рисунок 2а иллюстрирует результаты оптимизации, рис. 2б – листовую выкройку с новой топологией, рис. 2в – облегчённую шестерню после шлифовки зубьев. Внесение отверстий позволило уменьшить массу шестерни с ~0,27 кг до ~0,17 кг, то есть почти в 1,6 раза.

Многослойные образцы шестерен – как базовые, так и облегчённые – изготавливались по SL-технологии и подвергались производственным испытаниям. Их устанавливали в гитару механизма деления зубофрезерного станка 5Е32 вместо штатной шестерни, выполненной по традиционной технологии. Испытания продолжались 40 часов. Нарушений в работе механизма, повышенного шума или нагрева не наблюдалось. По завершении испытаний визуальный осмотр не выявил признаков износа, деформаций, сколов или трещин.

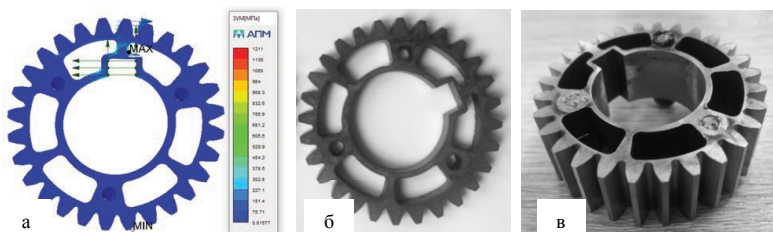


Рисунок 2 – Диаграмма распределения эквивалентных напряжений по фон Мизесу SVM(MПа) в шестерне под нагрузкой, листовая выкройка с оптимизированной топологией (б) и многослойная облегченная шестерня (в)

Проектирование и производство грядилья плуга

Грядиль представляет собой стальной брус прямоугольного сечения, служащий элементом крепления корпуса плуга к его балке. В процессе работы он обеспечивает жёсткую фиксацию корпуса в направлении движения и передаёт на него тяговое усилие от трактора.

Объектом конструкторско-технологического анализа выбран грядиль для оборотного плуга ППО-8РК (рис. 3а). Его габариты: высота $H=0,722$ м, длина $L=0,420$ м; размеры сечения: высота $h=0,080$ м, толщина $b=0,045$ м. Грядиль имеет шесть крепёжных отверстий: по три с каждой стороны. С одной стороны, он соединяется с балкой, с другой – с корпусом плуга, посредством болтов. Материал – сталь 35ХГСА; масса – 27,024 кг.

Плуг предназначен для обработки каменистых почв с удельным сопротивлением до 0,1 МПа. При эксплуатации грядиль подвергается переменным изгибающим нагрузкам, пиковые значения которых кратковременно в 2,7 раза превышают средние.

Традиционная технология изготовления грядилья на производстве включала: (1) отрезку, (2) нагрев, (3) гибку, (4) контроль ОТК, (5) вертикально-фрезерную обработку, (6) фрезерно-сверлильную, (7) зачистку заусенцев, (8) контроль ОТК, (9) объёмную закалку, (10) отпуск, (11) дробеочистку. Согласно данным табл. 4, суммарная трудоёмкость составляла около 6,2 ч.

Таблица 4 –Трудоёмкость (Т) операций традиционного технологического процесса изготовления грядилья

Операция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Т, мин	6	1	10	8	10	21	1	8	5	240	65

Основные виды используемого технологического оборудования: ленточнопильный станок (операция 1), гибочный станок (операции 2 и 3), вертикально-фрезерный станок (операция 5), вертикально-обрабатывающий

центр (операция 6), камерная печь (операции 9 и 10), дробеметная машина (операция 11). На слесарной операции 7 проводили очистку от заусенцев. На операциях контроля 4 и 8 проверяли точность размеров с чертежом.



Рисунок 3 – Грядиль плуга с традиционной конструкцией (а) и с модифицированной многослойной конструкцией (б), изготовленной с использованием SL-технологии

Как и в случае с шестернёй, при переходе на SL-технологии были изменены как конструкция грядиля, так и технологический процесс его изготовления.

Модифицированная технология включала следующие операции: (1) лазерная резка, (2) слесарно-сборочная, (3) объемная закалка, (4) отпуск, (5) дробеочистка, (6) повторная слесарно-сборочная операция. Согласно данным табл. 5, суммарная трудоёмкость составила около 3,8 ч, что существенно ниже по сравнению с традиционным процессом.

Таблица 5 – Трудоёмкость (Т) операций модифицированного технологического процесса изготовления грядиля

Операция	1	2	3	4	5	6
Т, мин	35	10	10	2	120	52

На операции лазерной резки, выполняемой на станке LaserCUT-1515-6-2-N-RT, одновременно формировались как контуры листовых выкроек, так и все необходимые отверстия, включая дополнительные. На слесарно-сборочной операции осуществлялась подготовка выкроек к термообработке: их собирали в пакет через проставки с зазором и стягивали болтами. Термообработка (объемная закалка и отпуск) и дробеочистка выполнялись аналогично операциям традиционного процесса. На завершающей сборочной операции выкройки извлекали из пакета и вновь собирали в многослойный грядиль для установки на плуг.

Переход от традиционной технологии к модифицированной, основанной на SL-технологии, позволил снизить трудоёмкость изготовления грядиля с 6,2 до 3,8 ч, что обеспечило рост

производительности примерно в 1,6 раза. По данным экономических расчётов, себестоимость уменьшилась в 1,4 раза. Достигнутые улучшения объясняются сокращением числа операций, в том числе наиболее трудоёмких и энергоёмких.

С целью снижения металлоёмкости и, как следствие, массы грядиля и всего плуга, была проведена топологическая оптимизация конструкции методом конечных элементов с использованием модуля APM FEM (CAD-система КОМПАС-3D) (по аналогии топологической оптимизацией шестерен). Анализ напряжённо-деформированного состояния позволил определить зоны с минимальными напряжениями, в которых были выполнены сквозные отверстия. На рис. 4, а–в представлены результаты оптимизации, а также облегчённый грядиль, изготовленный по SL-технологии.

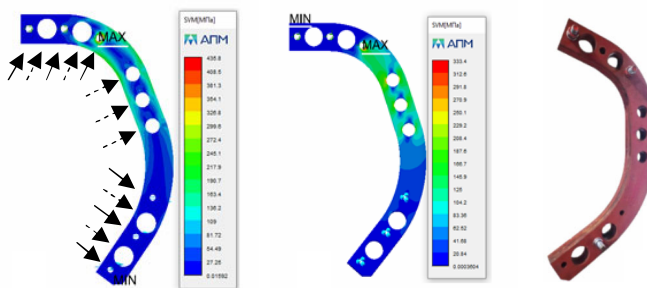


Рисунок 4 – Диаграммы распределения эквивалентных напряжений по фон Мизесу SVM (МПа) в листовых выкройках грядиля с модифицированной конструкцией при действии продольной (а) и поперечной (б) силы сопротивления и облегченный грядиль, полученный из листовых выкроек с оптимизированной топологией с использованием SL-технологии (в)

Грядиль, изготовленный по SL-технологии, прошёл полевые приёмочные испытания на соответствие требованиям СТБ 1388-2019 «Плуги тракторные лемешные общего назначения. Общие технические условия». Он был установлен на один из корпусов плуга ППО-8РК (рис. 3, б–г). Испытания проводились в течение 12 смен, общая наработка составила 192 га. В ходе испытаний отказов, деформаций или других повреждений не зафиксировано; параметры вспашки соответствовали установленным нормативам ТНПА.

Список использованной литературы

1. 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.

2. Толочко, Н. К. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // Вестник машиностроения. – 2020. – №10. – С. 11–15.

3. Толочко Н. К., Авраменко П. В., Кравцов В. Б., Копчик Д. И. Проблема ступенчатого рельефа при изготовлении шестерен по аддитивной технологии листового ламинирования // Агропанорама. 2022. №1. С. 2–7.

Summary. For the first time, a comprehensive methodological approach has been developed for the creation of steel machine parts using additive sheet lamination technology. This approach includes the design of multilayer, topologically optimized structures and combined technological processes that integrate traditional and additive operations. It enables a reduction in metal consumption while maintaining functional characteristics, increasing productivity, and lowering production costs.

As a result of implementing this approach, multilayer steel gears have been developed with a 1.6-fold weight reduction, a 1.5-fold increase in productivity, and a 5% reduction in production costs. Multilayer steel plow beams have also been created, achieving a 17% weight reduction, a 1.6-fold increase in productivity, and a 1.4% decrease in production costs.

УДК 631.363:636.085

Жилич Е.Л., заведующий лабораторией;

Никончук В.В.; Сапач С.Н.

*РУП «Научно-практический центр национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства», г. Минск, Республика Беларусь*

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ КОРМОВОГО СТОЛА КРС

Аннотация. Наличие кормов, их качество, грамотная организация процесса кормления и рациональное использование кормов являются основными условиями, определяющими эффективность производства молока и говядины. С целью механизации ряда процессов на фермах и комплексах по содержанию крупного рогатого скота, а также для снижения трудозатрат разработан подталкиватель-разрыхлитель кормов полунавесной а также самоходная машина с рядом сменных адаптеров.

Abstract. The availability of feed, its quality, competent organization of the feeding process and rational use of feed are the main conditions determining the efficiency of milk and beef production. In order to mechanize a number of processes on farms and complexes for keeping cattle, as well as to reduce labor costs, a semi-mounted feed pusher-loosener and a self-propelled machine with a number of replaceable adapters have been developed.

Ключевые слова. Подталкиватель кормов, повторная ферментация, кормовой стол, кормовой проход, адаптер, самоходная машина.

Keywords. Feed pusher, re-fermenter, feed table, feed passage, adapter, self-propelled machine.