

УДК 621.77.04

Н.К. ТОЛОЧКО, д-р физ.-мат. наук, проф.
профессор кафедры технологии и организации технического сервиса¹
E-mail: n.tolochko1951@mail.ru

П.В. АВРАМЕНКО, канд. техн. наук, доц.
заведующий кафедрой стандартизации, метрологии и инженерной графики¹
E-mail: minsk888@mail.ru

В.Б. КРАВЦОВ
старший преподаватель кафедры технологии и организации технического сервиса¹
E-mail: kravcovslava@tut.by

А.П. ЛЕВШУКОВ
заместитель директора – главный инженер²
E-mail: priem.gl.eng@mgw.by

К.Ю. АСТРЕЙКО
начальник управления сельскохозяйственных машин²
E-mail: kb_norno@mgw.by

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Минский завод шестерен», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 29.07.2024.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИСТОВОГО ЛАМИНИРОВАНИЯ

Рассмотрены возможности и перспективы применения аддитивной технологии листового ламинирования для прямого изготовления металлических деталей сельхозтехники на примере изготовления стального грядиля плуга. Выполнен анализ традиционной конструкции грядиля плуга и традиционной технологии его изготовления. Проведено модифицирование конструкции грядиля, включая формирование многослойной структуры и топологическую оптимизацию с учетом его изготовления с использованием аддитивной технологии листового ламинирования. Изготовлен экспериментальный образец грядиля модифицированной конструкции по комбинированной аддитивной и традиционной технологии и проведены его испытания в составе плуга. Выполнено сопоставление особенностей конструкции и структурной схемы технологического процесса изготовления грядиля традиционным и модифицированным способами. Показано, что предложенные конструкторско-технологические разработки обеспечивают снижение массы грядиля на 17 % и более при сохранении его требуемых функциональных свойств, повышение в 1,6 раза производительности и снижение в 1,4 раза стоимости его изготовления. Таким образом, внедрение аддитивной технологии листового ламинирования в традиционную технологическую цепочку изготовления металлических деталей позволяет повысить эффективность производства.

Ключевые слова: грядиль плуга, конструкция, изготовление, испытание, аддитивная технология, листовое ламинирование

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-59-65>

Введение. Аддитивные технологии применяются в машиностроении при изготовлении деталей машин. Поскольку большинство деталей являются металлическими, то особый практический интерес представляют такие аддитивные технологии, которые позволяют напрямую создавать детали из металла [1, 2]. К ним относит-

ся ряд технологий, основанных на селективной термообработке металлического порошка или проволоки, осуществляемой лазерным (Selective Laser Melting, Laser Metal Deposition) или электронным лучом (Electron Beam Melting, Electron Beam Freeform Fabrication), а также плазмой (Ion Fusion Formation) или электродуговым разрядом

(Gas Metal Arc Welding). Их широкое применение сдерживается большой стоимостью технологического оборудования (3D-принтеров), малыми размерами рабочей зоны построения, а также низкой производительностью, обусловленной присущим им последовательно-фрагментарным характером формирования наращиваемых слоев строительного материала.

От них принципиально отличается аддитивная технология листового ламинирования — Sheet Lamination (SL), согласно которой детали создаются непосредственно из металлических листов. В практическом отношении наиболее интересен один из вариантов этой технологии — CSB-SL-технология (далее — SL-технология), которая реализуется по схеме “cut–stack–bond” (CSB) со следующей последовательностью операций: контурный раскрой листового металла (лазером или фрезой), пакетирование листовых выкроек и их соединение между собой. Она характеризуется сравнительно малой стоимостью технологического оборудования — раскройных станков; большими размерами рабочей зоны построения, которые определяются размерами раскройного стола и достигают 1–2 м и более; высокой производительностью, поскольку создаваемая деталь наращивается сразу же готовыми слоями — листовыми выкройками [7].

SL-технология впервые была применена в 1974 году для изготовления из металла формообразующих элементов штамповых пресс-форм и некоторых других деталей, при построении которых пакетированные металлические листовые выкройки соединяли между собой болтами [3]. Болтовые соединения просты в практической реализации, прочно прижимают листы друг к другу, поэтому их неоднократно использовали в этой технологии для изготовления все тех же штамповых пресс-форм [4, 5]. Но они непригодны для изготовления пресс-форм для литья под давлением из-за утечки расплава через зазоры между слоями. Поэтому при реализации этой технологии болтовые соединения заменяют при необходимости более сложными реализуемыми на практике соединениями сваркой [7–9] или пайкой [10–13], а также клеем [5, 14].

Для дальнейшего развития SL-технологии важно определить пути ее наиболее рационального применения при изготовлении деталей машин с учетом как ее достоинств, так и недостатков.

В данной статье рассмотрены предварительные результаты совместной работы специалистов Белорусского государственного аграрного технического университета (БГАТУ) и ОАО «Минский завод шестерен» (МЗШ) в области изготовления металлических деталей сельхозтехники с использованием SL-технологии на примере изготовления грядиля плуга. Развитие аддитивного производства сельхозтехники является весьма актуальным, поскольку сельскохозяйственное машиностроение

занимает значительное место в современном машиностроительном комплексе. В условиях наблюдаемого в последние годы усиления конкурентной борьбы в агропромышленной сфере создание новых видов сельхозтехники на основе наукоемких технологий, включая аддитивные технологии, является важным фактором повышения эффективности сельского хозяйства, роста объемов выпуска высококачественной сельхозпродукции [15].

Традиционные конструкция и технология изготовления грядиля. Грядиль — это деталь плуга в виде стального бруса прямоугольного поперечного сечения, посредством которого обеспечивается крепление корпуса плуга к балке плуга. Во время работы плуга грядиль жестко удерживает корпус в заданном направлении движения и передает ему тяговое усилие от трактора.

В качестве объекта конструкторско-технологических разработок выбран грядиль, устанавливаемый на оборотный плуг, показанный в традиционной конструкции на рисунке 1. Габаритные размеры грядиля: высота $H = 0,722$ м, длина $L = 0,420$ м; размеры поперечного сечения: высота $h = 0,080$ м, толщина $b = 0,045$ м. Грядиль имеет 6 крепежных отверстий — по 3 отверстия с каждой стороны. Одной из сторон грядиль крепится при помощи трех болтов к балке, к другой стороне грядиля прикрепляется корпус, также при помощи трех болтов. Грядиль изготовлен из стали 35ХГСА, его исходный вес — 27,024 кг.

Плуг предназначен для вспашки каменистых почв с удельным сопротивлением (показателем энергоемкости процесса вспашки) до 0,1 МПа. Во время работы плуга грядиль испытывает переменные изгибающие нагрузки, величина которых непрерывно изменяется, при этом кратковременные пиковые нагрузки существенно (в 2,7 раза) превосходят средние значения.

Структурная схема традиционного технологического процесса изготовления грядиля плуга на МЗШ показана на рисунке 2, трудоемкость операций — в таблице 1.

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), дробебетонная машина (операция 11). На слесарной операции 7 проводили очистку заусенцев. На операциях контроля 4 и 8 проверяли точность размеров.

Модифицированные конструкция и технология изготовления грядиля. Модифицированная конструкция грядиля при его изготовлении с помощью SL-технологии заключалась в создании многослойной (слоистой) структуры (в соответствии с послойным характером аддитивного построения) и в топологической оптимизации, направленной на уменьшение массы (с учетом

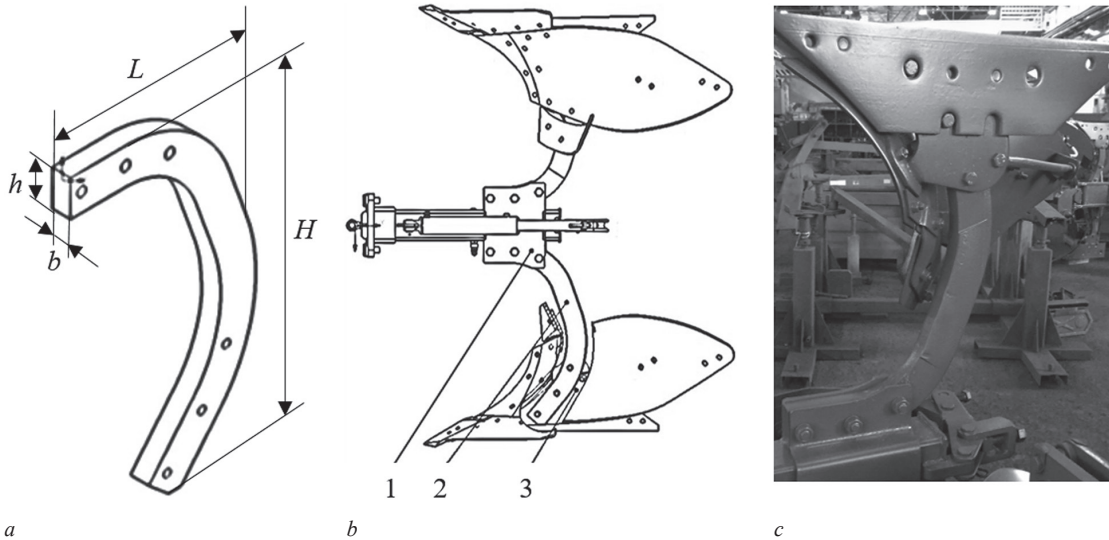


Рисунок 1 — Грядиль плуга с традиционной конструкцией: *a* — 3D-модель грядиля; грядиль в составе плуга: *b* — схема; *c* — внешний вид; 1 — балка; 2 — грядиль; 3 — корпус
Figure 1 — Plow beam with traditional design: *a* — beam 3D model; beam as a part of the plow: *b* — scheme; *c* — external view; 1 — bar; 2 — beam; 3 — body



Рисунок 2 — Структурная схема традиционного технологического процесса изготовления грядиля на МЗШ
Figure 2 — Structural diagram of the traditional technological process of beam manufacturing at OJSC “Minsk Gear Works” (MGW)

возможностей проектирования, предоставляемых при аддитивном построении).

Для SL-технологии, как и других аддитивных технологий, характерны погрешности построения деталей, связанные с формированием ступенчатого рельефа на их боковых стенках и определяемые по формуле

$$\varepsilon = scos\alpha,$$

где s — высота ступеньки рельефа, равная толщине слоев детали; α — угол наклона боковой стенки относительно плоскости листовой выкройкой [16].

Согласно этой формуле ε снижается с уменьшением s и увеличением α ; если $\alpha = 90^\circ$, то $\varepsilon = 0$ независимо от значений s . Это означает, что при SL-построении детали формирование ступенчатого рельефа может быть в принципе исключено, если деталь обладает особой формой, что становится

возможным наращивать составляющие ее слои (листовые выкройки) так, чтобы они были ориентированы перпендикулярно ее боковым стенкам.

Такой особой формой обладает грядиль, характеризующийся наличием прямоугольного поперечного сечения. Поэтому при SL-построении грядиля листовые выкройки вырезали так, чтобы они были параллельны его основной плоскости, а их наращивание осуществляли, соответственно, по его толщине. Схема расположения листовых выкроек в пакете, укладываемом при SL-построении грядиля, а также внешний вид пакета листовых выкроек (без свинчивания) фрагментарно показаны на рисунке 3.

При фиксированной толщине b грядиля количество n составляющих его листовых выкроек определяется их толщиной s : $n = b/s$. Выкройки вырезали из листов стали 65Г толщиной $s = 5$ мм; поскольку $b = 45$ мм, то для изготовления грядиля были вырезаны выкройки в количестве $n = 9$.

Одной из важных задач совершенствования сельхозтехники является уменьшение ее массы,

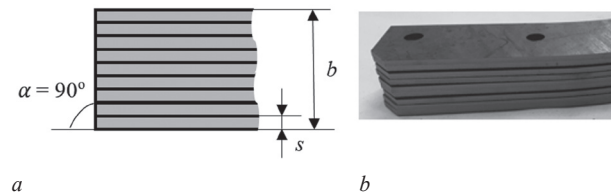


Рисунок 3 — Схема расположения листовых выкроек в пакете (*a*) и внешний вид пакета листовых выкроек (*b*) (фрагменты)
Figure 3 — Layout of the pattern sheets in the package (*a*) and appearance of the pattern sheet package (*b*) (fragments)

Таблица 1 — Трудоемкость (Т) операций традиционного технологического процесса изготовления грядиля
Table 1 — Labor intensity (T) of operations of the traditional technological process of beam manufacturing

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

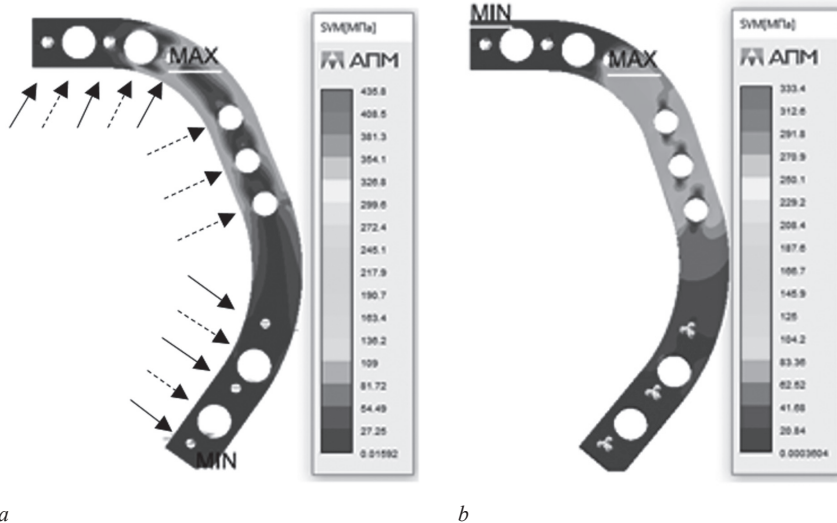


Рисунок 4 — Диаграммы распределения эквивалентных напряжений по фон Мизесу SVM (МПа) в листовых выкройках грядиля с модифицированной конструкцией при действии продольной (а) и поперечной (б) силы сопротивления
 Figure 4 — Von Mises SVM (MPa) equivalent stress distribution diagrams in pattern sheets of the beam with modified design under the action of longitudinal (a) and transverse (b) resistance force

что позволяет снизить расход топлива и повысить энергоэффективность эксплуатации [17]. В связи с этим было исследовано напряженно-деформированное состояние 3D-модели грядиля методом конечных элементов с использованием программного пакета APM FEM CAD-системы КОМПАС-3D, а также с учетом условий его эксплуатации с целью уменьшения массы грядиля и, как следствие, массы всего плуга. Для этого были получены и проанализированы диаграммы распределения полей напряжения в конструкции грядиля и на этой основе выработаны предложения по изменению конструкции путем внесения в нее дополнительных сквозных отверстий, расположенных в наименее напряженных участках. Результаты выполненной таким образом топологической оптимизации конструкции листовых выкроек грядиля представлены на рисунке 4, где сплошными стрелками указаны исходные отверстия, служащие для крепления грядиля в составе плуга с помощью болтов и одновременно для стягивания составляющих его листовых выкроек, а пунктирными стрелками — более крупные дополнительные сквозные отверстия, обеспечивающие снижение массы грядиля. На рисунке 5 показан внешний вид топологических оптимизированных листовых выкроек грядиля, собранных в пакет (с частичным свинчиванием).

Модифицированная технология изготовления грядиля. Использование SL-технологии на начальной стадии изготовления грядиля, связанной с вырезкой листовых выкроек, привело к ряду изменений в общей технологии его изготовления. Структурная схема модифицированного технологического процесса изготовления грядиля плуга (БГАТУ/МЗШ) показана на рисунке 6, трудоемкость операций — в таблице 2.

На операции лазерной резки 1 (см. рисунок 6), выполнявшейся с использованием лазерного стан-

ка LaserCUT-1515-6-2-N-RT (ООО «Рухсервомотор», Республика Беларусь), установленного в лаборатории лазерной обработки БГАТУ, вырезали не только сами выкройки, но и отверстия в них — как исходные, так и дополнительные. На слесарно-сборочной операции 2 проводили подготовку листовых выкроек к термообработке, для чего их собирали в пакет через проставки так, чтобы между ними был небольшой зазор, и стягивали болтами.



Рисунок 5 — Пакет листовых выкроек грядиля с модифицированной конструкцией
 Figure 5 — Pattern sheets package of the beam with modified design

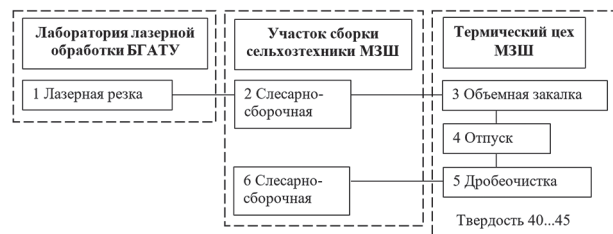


Рисунок 6 — Структурная схема модифицированного технологического процесса изготовления грядиля на МЗШ
 Figure 6 — Structural scheme of the modified technological process of beam manufacturing at MGW

Таблица 2 — Трудоемкость (Т) операций модифицированного технологического процесса изготовления грядиля
 Table 2 — Labor intensity (T) of operations of the modified technological process of beam manufacturing

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

Операции термообработки 3 и 4 и операция дробеочистки 5 выполнялись в основном так же, как и аналогичные операции традиционного технологического процесса изготовления грядиля. На слесарно-сборочной операции 6 разбирали пакет листовых выкроек с проставками, после чего вновь собирали выкройки в многослойный грядиль для последующего монтажа на плуге.

Кроме указанных выше операций и в традиционном, и в модифицированном технологических процессах изготовления грядиля выполняли операцию покраски листовых выкроек перед их окончательной сборкой в грядиль (эта операция не указана в структурных схемах технологических процессов на рисунках 2 и 6). Внешний вид листовых выкроек после покраски показан на рисунке 7.

Внешний вид грядиля плуга, изготовленного с использованием SL-технологии и установленного на плуге, показан на рисунке 8 (экспонат Международной специализированной выставки «БЕЛАГРО-2023»).

Экспериментальный образец модифицированного грядиля плуга, изготовленного с использованием SL-технологии, был испытан в полевых условиях в рамках приемочных испытаний на соответствие оборотного плуга требованиям СТБ 1388-2019 «Плуги тракторные лемешные общего назначения. Общие технические условия» (рисунок 9). Образец грядиля был установлен на один из корпусов плуга, агрегированного с трактором «Кировец» модели К-742М Стандарт 1 и трактором BELARUS-3522. Испытания проводились с участием специалистов МЗШ в течение 12 рабочих смен, общая наработка плуга с установленным образцом грядилем за время испытаний составила 192 га. В ходе испытаний отказов в работе, повреждений (деформаций, трещин) грядиля не было выявлено, значения показателей вспашки соответствовали нормам ТНПА.



Рисунок 7 — Листовые выкройки грядиля на участке покраски в механическом цехе МЗШ
Figure 7 — Pattern sheets of the beam at the painting area in the MGW mechanical shop

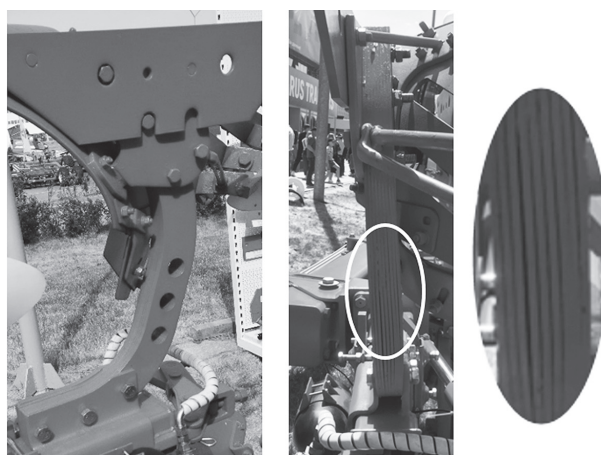


Рисунок 8 — Грядиль плуга с модифицированной конструкцией, изготовленный с использованием SL-технологии (БГАТУ/МЗШ)
Figure 8 — Plow beam with modified design, manufactured using SL technology (BSATU/MGW)



Рисунок 9 — Грядиль плуга ПО-(4+1)-40 с модифицированной конструкцией во время полевых испытаний
Figure 9 — Beam of the plow PO-(4+1)-40 with modified design during field testing

Заклучение. Для оборотного плуга разработана модифицированная конструкция грядиля с учетом возможностей его изготовления с использованием аддитивной технологии листового ламинирования — SL-технологии. Грядиль с модифицированной конструкцией характеризуется многослойной структурой, состоящей из листовых выкроек, подвергнутых топологической оптимизации, благодаря чему масса грядиля уменьшается на 17 % по сравнению с исходной.

Разработан и реализован модифицированный технологический процесс изготовления грядиля с помощью SL-технологии. Согласно расчетам, выполненным на МЗШ, при реализации модифицированного технологического процесса изготовления грядиля производительность изготовления увеличивается в 1,6 раза, а себестоимость изготовления уменьшается в 1,4 раза по сравнению с реализацией традиционного процесса.

Полевые испытания грядил, изготовленного с помощью SL-технологии, показали, что он обладает требуемой работоспособностью, по рабочим характеристикам соответствует аналогичным грядилам, установленным на плуге при проведении испытаний и изготовленным по традиционной технологии, и может использоваться согласно своему функциональному назначению в составе оборотного плуга.

Таким образом, результаты выполненных конструкторско-технологических разработок свидетельствуют о перспективности применения SL-технологии для прямого изготовления металлических деталей машин. Одним из важных направлений дальнейшего развития этой технологии является разработка и создание технологического оборудования, позволяющего осуществлять в автоматизированном режиме SL-операции, включая как получение, так и сборку листовых выкроек [18].

Список 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. A review of the metal additive manufacturing processes / M. Tebianian, S. Aghaie, N.S.R. Jafari [et al.] // *Materials*. — 2023. — Vol. 16, iss. 24. — 28 p. — DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16247514>.
3. Толочко, Н.К. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // *Вестник машиностроения*. — 2020. — № 10. — С. 11–15. — DOI: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-10-11-15>.
4. Patent US № 3932923A Method of generating and constructing three-dimensional bodies / P.L. DiMatteo. — 1976.
5. Walczyk, D.F. Bonding methods for laminated tooling / D.F. Walczyk, N.Y. Dolar // *Proc. 1997 International Freeform Fabrication Symp.*, Austin, 1997. — P. 211–221.
6. Alami, A.H. Using laminated metal tooling (LMT) in die manufacturing for clay moulding / A.H. Alami // *ISMA08: proc. 5th Int. Symp. Mechatronics and its Applications*, Amman, May 27–29, 2008. — 7 p. — DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMA.2008.4648806>.
7. Nakagawa, T. Blanking tool by stacked bainite steel plates / T. Nakagawa // *Press Techn.* — 1979. — P. 93–101.
8. 分层实体制造中金属分层板结合的新方法 / 易树平, 哈津, 林利红, 张津 // *重庆大学学报*. — 25卷, 2期. — P. 1–4. — DOI: <http://dx.doi.org/10.11835/j.issn.1000-582X.2002.02.001>. = Connect technique of laminated object manufacturing using metallic materials as modeling materials / S.P. Yi, J. Ha, L.H. Lin, J. Zhang // *J. Chongqing Univ.* — 2002. — Vol. 25, iss. 2. — P. 1–4. — DOI: <http://dx.doi.org/10.11835/j.issn.1000-582X.2002.02.001>.
9. Recent developments in metal laminated tooling by multiple laser processing / T. Himmer, A. Techel, S. Nowotny, E. Beyer // *Proc. 2002 International Solid Freeform Fabrication Symp.*, Austin, August 5–7, 2002 / Univ. of Texas. — 2002. — P. 466–473.
10. 吉野 雅彦. 薄鋼板積層造形法によるRapid Manufacturing System / 吉野 雅彦, 帯川利之, 篠塚 淳 // *日本機械学会論文 集 C編*. — 2000. — 66 卷, 642 号. — P. 667–672. — DOI: <https://doi.org/10.1299/kikaic.66.667>. = Yoshino, M. Rapid manufacturing system by sheet steel lamination method / M. Yoshino, T. Obikawa, J. Shinzuka // *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Series C*. — 2000. — Vol. 66, iss. 642. — P. 265–270. — DOI: <https://doi.org/10.1299/kikaic.66.667>.
11. Bryden, B.G. Sequential laminated tooling, joined by brazing, for injection molding / B.G. Bryden, I.R. Pashby // *Rapid Prototyping J.* — 1999. — Vol. 5, iss. 2. — P. 89–93. — DOI: <https://doi.org/10.1108/13552549910267470>.
12. Yoon, S.H. Rapid laminated tooling by a brazing and soldering process / S.H. Yoon, S.J. Na // *J. Manuf. Proc.* — 2003. — Vol. 5, iss. 2. — P. 118–126. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(03\)70047-4](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(03)70047-4).
13. 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.
14. Zak, G. Adhesive bonding of sheet for laminated metal tooling / G. Zak, W. Wang // *Proc. 2002 International Solid Freeform Fabrication Symp.* — Austin, 2002. — P. 502–509.
15. Клейменова, Ю.А. Особенности развития сельскохозяйственного машиностроения в условиях современного санкционного давления / Ю.А. Клейменова, Г.Л. Баяндурян // *Аграрная наука*. — 2024. — № 379(2). — С. 133–138. — DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-133-138>.
16. Толочко, Н.К. Аддитивные технологии: проблема ступенчатого рельефа поверхности / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // *Агропанорама*. — 2019. — № 2. — С. 12–16.
17. Несмиян, А.Ю. Этапы и перспективы развития навесной сельскохозяйственной техники / А.Ю. Несмиян, А.П. Горбатьюк, А.С. Каймакова // *Научный журнал Росс. НИИ проблем мелиорации*. — 2020. — № 2(38). — С. 179–195. — DOI: <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2020-2-179-195>.
18. Комплексы мехатронного оборудования для аддитивного производства крупногабаритных изделий / М.Л. Хейфец, В.С. Крутько, Н.Л. Грецкий, Д.С. Рагуцкая // *Научное машиностроение*. — 2022. — № 7(133). — С. 9–16. — DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-1-7-9-16>.

TOLOCHKO Nikolay K., D. Sc. in Phys. and Math., Prof.

Professor of the Technologies and Organization of Technical Services Department¹

E-mail: n.tolochko1951@mail.ru

AURAMENKA Pavel V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Standardization, Metrology and Engineering Graphics Department¹

E-mail: minsk888@mail.ru

KRAVTSOV Vyacheslav B.

Senior Lecturer of the Technologies and Organization of Technical Services Department¹

E-mail: kravcovslava@tut.by

LEVSHUKOV Andrey P.

Deputy Director – Chief Engineer²

E-mail: priem.gl.eng@mgw.by

ASTREYKO Kirill Yu.

Head of the Department of Agricultural Machinery²

E-mail: kb_norno@mgw.by

¹Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²OJSC “Minsk Gear Works”, Minsk, Republic of Belarus

MANUFACTURING OF AGRICULTURAL MACHINERY METAL PARTS USING ADDITIVE SHEET LAMINATION TECHNOLOGY

Possibilities and prospects are considered for application of additive sheet lamination technology for direct manufacturing of agricultural machinery metal parts on the example of manufacturing of plow steel beam. Traditional design of plow beam and traditional technology of its manufacturing are analyzed. Modification of the beam design, including formation of multilayer structure and topological optimization with regard to its fabrication has been carried out using additive sheet lamination technology. The experimental sample of the beam of modified design was produced using combined additive and conventional technology and tested as part of the plow. Comparison of the design features and structural scheme of the technological process of the beam manufacturing using the traditional and modified methods is carried out. It is shown that the proposed design and technological developments provide a 17 % and more decrease in the beam weight while maintaining its required functional properties, 1.6 times increase in productivity and 1.4 times decrease in the cost of its manufacture. Thus, the incorporation of additive sheet lamination technology into the traditional technological chain of metal parts manufacturing makes it possible to increase the efficiency of production.

Keywords: plow beam, design, manufacturing, testing, additive technology, sheet lamination

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-1-70-59-65>

References

- Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, GNTs RF FGUP "NAMI" Publ., 2015. 220 p. (in Russ.).
- Tebianian M., et al. A review of the metal additive manufacturing processes. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16247514>.
- Tolochko N.K., Sokol O.V. Metodologicheskie aspekty otsenki effektivnosti additivnoy tekhnologii listovogo laminirovaniya [Methodological aspects of assessing the effectiveness of additive technology of sheet lamination]. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2020, no. 10, pp. 11–15. DOI: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-10-11-15> (in Russ.).
- DiMatteo P.L. *Method of generating and constructing three-dimensional bodies*. Patent US, no. 3932923A, 1976.
- Walczyk D.F., Dolar N.Y. Bonding methods for laminated tooling. *Proc. 1997 International solid freeform fabrication symposium*. Austin, 1997, pp. 211–221.
- Alami A.H. Using laminated metal tooling (LMT) in die manufacturing for clay moulding. *Proc. 5th International symposium on mechatronics and its applications (ISMA08)*. Amman, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMA.2008.4648806>.
- Nakagawa T. Blanking tool by stacked bainite steel plates. *Press technique*, 1979, pp. 93–101.
- Yi S.P., Ha J., Lin L.H., Zhang J. Connect technique of laminated object manufacturing using metallic materials as modeling materials. *Journal of Chongqing University*, 2002, vol. 25, iss. 2, pp. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.11835/j.issn.1000-582X.2002.02.001> (in Chinese).
- Himmer T., Techel A., Nowotny S., Beyer E. Recent developments in metal laminated tooling by multiple laser processing. *Proc. 2002 International solid freeform fabrication symposium*. Austin, 2002, pp. 466–473.
- Yoshino M., Obikawa T., Shinzuka J. Rapid manufacturing system by sheet steel lamination method. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Series C*, 2000, vol. 66, iss. 642, pp. 265–270. DOI: <https://doi.org/10.1299/kikaic.66.667> (in Japanese).
- Bryden B.G., Pashby I.R. Sequential laminated tooling, joined by brazing, for injection molding. *Rapid prototyping journal*, 1999, vol. 5, iss. 2, pp. 89–93. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552549910267470>.
- Yoon S.H., Na S.J. Rapid laminated tooling by a brazing and soldering process. *Journal of manufacturing processes*, 2003, vol. 5, iss. 2, pp. 118–126. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(03\)70047-4](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(03)70047-4).
- Ahari H., Khajepour A., Bedi S. Laminated injection mould with conformal cooling channels: optimization, fabrication and testing. *Journal of machinery manufacturing and automation*, 2013, vol. 2, iss. 2, pp. 16–24.
- Zak G., Wang W.X. Adhesive bonding of sheet for laminated metal tooling. *Proc. 2002 International solid freeform fabrication symposium*. Austin, 2002, pp. 502–509.
- Kleimenova Yu.A., Bayanduryan G.L. Osobennosti razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroyeniya v usloviyakh sovremenogo sanktsionnogo davleniya [Features of the development of agricultural engineering in the conditions of modern sanctions pressure]. *Agrarian science*, 2024, no. 379(2), pp. 133–138. DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-133-138> (in Russ.).
- Tolochko N.K., Sokol O.V. Additivnye tekhnologii: problema stupenchatogo relefa poverkhnosti [Additive technologies: the problem of stepped surface relief]. *Agropanorama*, 2019, no. 2, pp. 12–16 (in Russ.).
- Nesmiyan A.Yu., Gorbatyuk A.P., Kaymakova A.S. Etapy i perspektivy razvitiya navesnoy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Stages and prospects of development of mounted agricultural machinery]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, 2020, no. 2(38), pp. 179–195. DOI: <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2020-2-179-195> (in Russ.).
- Kheyfets M.L., Krutko V.S., Gretskey N.L., Ratutskaya D.S. Kompleksy mekhatronnogo oborudovaniya dlya additivnogo proizvodstva krupnogabaritnykh izdeliy [Mechatronic equipment systems for additive manufacturing of large-dimensioned products]. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2022, no. 7(133), pp. 9–16. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-1-7-9-16> (in Russ.).