УДК 621.9 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-77-82

ГИБРИДНЫЙ СТАНОК ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И НАПЛАВКИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Анциферов С.И., Сычёв Е.А., Карачевцева А.В., Запара У.И.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

Ключевые слова: гибридный станок, лазерная резка, лазерная наплавка, защитное покрытие, аддитивно-субтрактивная обработка, сменная технологическая головка, цифровой двойник, многономенклатурное производство.
Аннотация. В статье представлена конструкция гибридного станка, совмещающего операции лазерной резки листовых металлических заготовок и лазерной наплавки, что позволяет реализовать аддитивно-субтрактивную технологию обработки в рамках единого рабочего цикла. Рассмотрены конструктивная схема станка, технологический цикл обработки, вспомогательные системы и возможности применения оборудования для изготовления, восстановления и локального упрочнения деталей, нанесения защитных покрытий, а также производства биметаллических и функционально-градиентных изделий. Для проектирования оборудования разработан параметризированный цифровой двойник, обеспечивающий виртуальную проверку сборки, геометрических ограничений и технологических операций, а также VR-визуализацию и возможность обучения персонала. Выполнено конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом эксплуатационных нагрузок. Полученные результаты подтверждают достаточную прочность и жесткость разработанного гибридного станка, и возможность его применения для многономенклатурного производства, восстановления и функциональной обработки металлических изделий.

HYBRID MACHINE FOR CUTTING METAL PRODUCTS AND SURFACING PROTECTIVE COATINGS

Antsiferov S.I., Sychev E.A., Karachevtseva A.V., Zapara U.I.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Keywords: hybrid machine, laser cutting, laser cladding, protective coating, additive-subtractive machining, interchangeable technological head, digital twin, multi-product manufacturing.
Abstract. The article presents the design of a hybrid machine that combines the operations of laser cutting of sheet metal blanks and laser cladding, which makes it possible to implement an additive-subtractive processing technology within a single working cycle. The structural diagram of the machine, the technological processing cycle, auxiliary systems, and the possibilities of using the equipment for manufacturing, restoring, and local hardening of parts, applying protective coatings, as well as producing bimetallic and functionally graded products, are considered. A parametrized digital twin has been developed for equipment design, providing virtual verification of the assembly, geometric constraints, and technological operations, as well as VR visualization and the possibility of training personnel. Finite element modeling of the stress-strain state of the structure has been carried out, taking into account operational loads. The obtained results confirm the sufficient strength and rigidity of the developed hybrid machine and the possibility of its use for multi-product production, restoration, and functional processing of metal products.

Современное машиностроительное производство характеризуется необходимостью изготовления широкой номенклатуры изделий при одновременном сокращении времени технологической подготовки и повышения

эффективности использования оборудования. Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение гибридных технологических комплексов, объединяющих аддитивные и субтрактивные операции в пределах одной рабочей установки.

В традиционной организации технологического процесса выполнение операций раскроя, нанесения покрытий и восстановления поверхностей осуществляется на различных единицах оборудования, что требует дополнительных операций транспортирования, базирования и позиционирования заготовки. Для многономенклатурного производства – это приводит к увеличению вспомогательного времени и снижению гибкости производственной системы. В связи с этим актуальной задачей является разработка гибридного станка, обеспечивающего последовательное выполнение аддитивных и субтрактивных операций при сохранении единой системы координат и базирования заготовки.

Разрабатываемый гибридный станок предназначен для обработки листовых материалов и сочетает лазерную резку с технологией наплавки. Такая конструкция позволяет в рамках одного рабочего цикла выполнять формирование заготовки путем удаления материала, а затем наносить на заданные участки дополнительный слой металла. В документе отмечается, что объединение лазерной резки и WAAM позволяет реализовать концепцию аддитивно-субтрактивного производства, при которой на одной установке возможно вырастить металлическую заготовку, вырезать в ней необходимые контуры, сформировать дополнительные элементы или восстановить изношенные участки [1-3].

Особенностью рассматриваемого оборудования является применение сменных технологических головок. В зависимости от выполняемой операции устанавливается лазерная головка для резки, либо головка для наплавки. Такой вариативный состав является одним из основных элементов конструкции гибридного станка.

Гибридный станок представляет собой многофункциональный обрабатывающий центр, в котором операции лазерной резки и наплавки объединены в пределах одной установки. Субтрактивная операция используется для удаления материала и получения требуемого контура детали, а аддитивная операция для нанесения нового материала на поверхность заготовки.

Гибридный станок предназначен для обработки металлических листовых заготовок и нанесения износостойких, упрочняющих и термоизоляционных покрытий. Его применение целесообразно при изготовлении деталей с локальным упрочнением, восстановлении изношенных поверхностей, создании биметаллических и функционально-градиентных изделий, изготовлении многокомпонентных деталей, пресс-форм, прототипов и мелких серий. Совмещение операций снижает трудоемкость и количество переустановок, а также повышает точность взаимного расположения наплавленного участка и контура реза [1, 4-6].

Гибридный станок для раскроя листовых материалов (рис. 1) состоит из рамы 1, по направляющим которой на каретке установлен подвижный портал, обеспечивающий линейное перемещение режущего инструмента по координате X. В состав технологического оснащения входят аспирационная установка (система

удаления стружки, пылеудаления) 3 для удаления отходов, компрессор 4 для пневмоприводов и вакуумный насос 5 для фиксации листового материала.

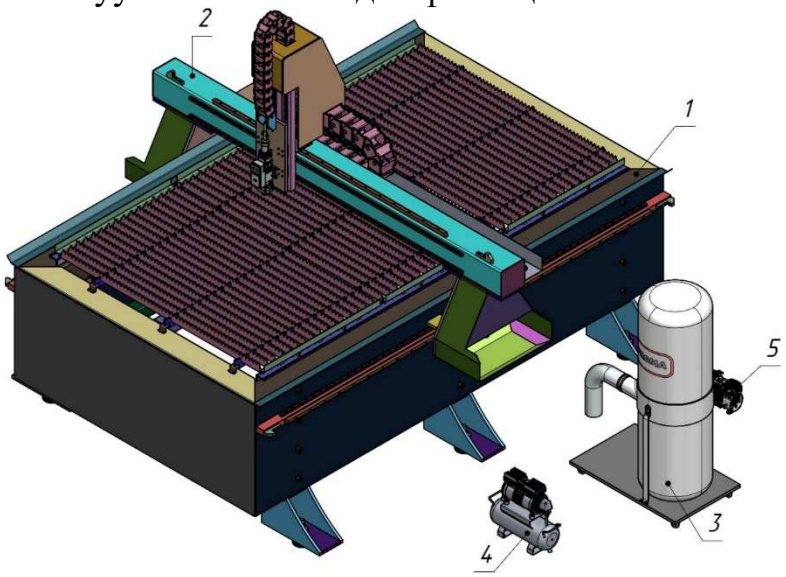


Рис. 1. Гибридный станок для раскроя листовых материалов состоит из: 1 – рама; 2 – портал горизонтального перемещения оси X; 3 – аспирационная установка; 4 – компрессор; 5 – вакуумный насос

Технологический цикл включает два основных этапа. На первом этапе используется лазерная головка: сфокусированный луч расплавляет металл, а поток газа удаляет расплав из зоны реза, обеспечивая получение заготовок, отверстий и пазов требуемой формы. На втором этапе режущая головка заменяется головкой для наплавки. Лазер формирует локальную ванну расплава, в которую подается металлический порошок или проволока и после охлаждения образуется прочно связанный с основой слой нового металла. Послойное повторение процесса позволяет наращивать трехмерные элементы, восстанавливать изношенные поверхности и наносить защитные покрытия.

Вспомогательные системы обеспечивают стабильность процесса, аспирация удаляет дым, продукты горения и мелкие частицы из рабочей зоны, при этом компрессор подает сжатый воздух для удаления продуктов обработки, охлаждения и защиты оптики, а вакуумный насос фиксирует листовую заготовку на рабочем столе [2, 5].

Для проектирования оборудования разработан параметризированный управляемый цифровой двойник с вариативным исполнением конструктивных элементов и возможностью изменения геометрических размеров в зависимости от обрабатываемых деталей. Цифровые двойники основных составных частей станка могут использоваться при формировании многономенклатурного гибридного производства [7, 8].

Верификация цифрового двойника включает проверку сборки, зазоров, пересечений, геометрических ограничений, скруглений и фасок. Выявленные несоответствия корректируются с последующей повторной проверкой. Дополнительно предусмотрена VR-визуализация, позволяющая наглядно оценивать траектории инструмента, сокращать время пусконаладки и использовать виртуальную модель для обучения персонала.

Для оценки работоспособности станка проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции. Исследование было направлено на определение прочности и жесткости оборудования при воздействии эксплуатационных нагрузок.

В расчетной схеме (рис. 2) модели учитывались сила, приложенная к лазерной головке, равная 1850 Н, вес листовой заготовки 8200 Н, собственный вес конструкции, а также ускорение портала при движении.

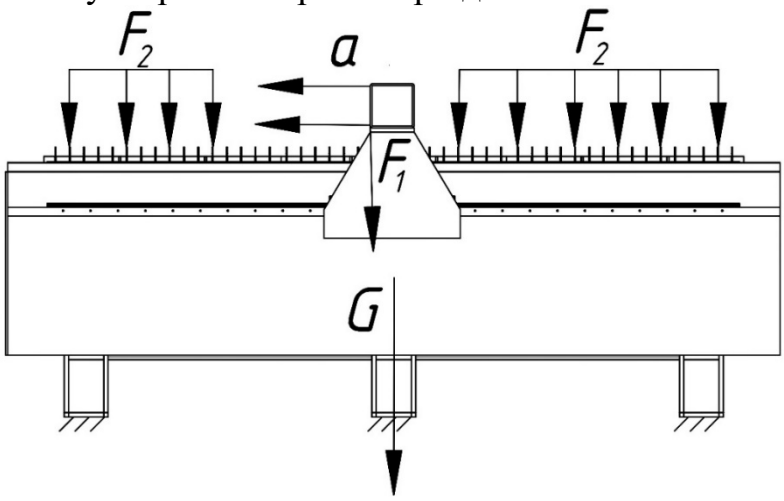


Рис. 2. Расчетная схема гибридного станка для раскроя листовых материалов

Для компонентов станка были заданы соответствующие физико-механические характеристики материалов. Для проведения расчетов были созданы конечно-элементные модели отдельных компонентов и сборочной единицы станка.

Полученные результаты показывают, что конструкция обладает достаточной прочностью и жесткостью. Максимальные перемещения не превышают установленных ограничений, поэтому станок способен обеспечивать требуемую точность при выполнении операций лазерного раскроя при выполнении операций наплавки нагрузка на станок будет аналогичной.

Основной эффект от применения рассматриваемого станка связан с объединением нескольких технологических операций в пределах одной рабочей системы. В традиционном варианте после резки заготовку необходимо переместить на другое оборудование для нанесения покрытия. Это приводит к дополнительным операциям базирования, закрепления и контроля положения детали.

Использование сменных головок позволяет выполнять резку и наплавку без изменения положения заготовки. Благодаря этому повышается точность взаимного расположения зоны покрытия и контура детали, а также сокращается трудоемкость производства. В исходном документе отдельно отмечается снижение количества переустановок и повышение точности взаимного расположения наплавленных зон и контура раскроя.

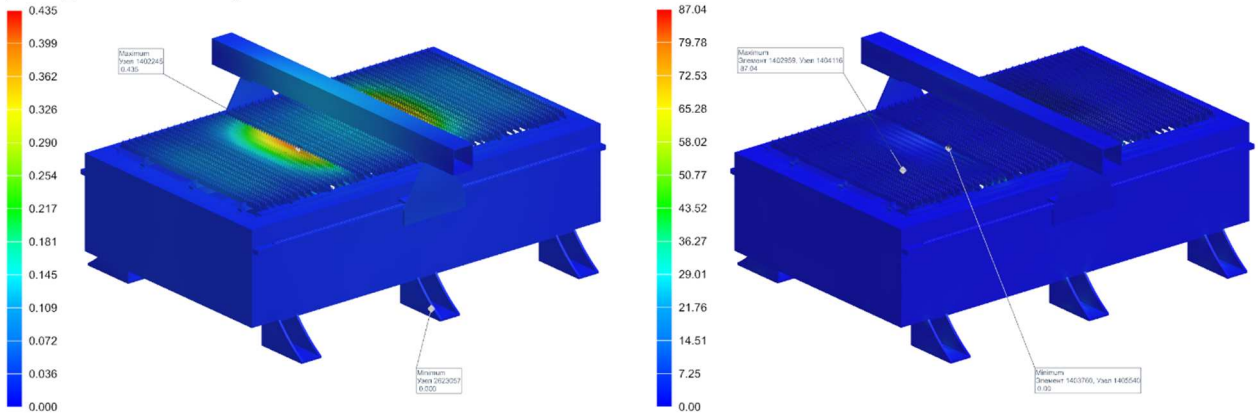
Гибридная конструкция особенно перспективна для многономенклатурного производства, поскольку один станок способен выполнять различные технологические операции и обрабатывать детали с различной геометрией. Разработанные цифровые двойники основных компонентов станка также

рассматриваются в документе как основа для создания многономенклатурного гибридного производства.

Разработанная конструкция гибридного станка со сменными технологическими головками объединяет операции лазерной резки металлических изделий и лазерной наплавки защитных покрытий в рамках единого технологического комплекса. Применение сменных головок позволяет последовательно выполнять субтрактивную и аддитивную обработку без переноса заготовки между различными единицами оборудования, что снижает количество переустановок, трудоемкость и повышает точность взаимного расположения обрабатываемых зон.

Использование технологии наплавки позволяет формировать износостойкие, упрочняющие, термоизоляционные и другие функциональные покрытия, восстанавливать изношенные поверхности, а также создавать биметаллические и функционально-градиентные детали. При этом цифровой двойник станка обеспечивает возможность параметрического проектирования, верификации, анализа собираемости и виртуального исследования технологического оборудования.

Результаты инженерного анализа подтверждают работоспособность конструкции: максимальное перемещение (рис. 3, а) составляет 0,435 мм при допустимом значении 0,50 мм, а максимальное напряжение (рис. 3, б) 87,04 МПа при пределе текучести стали Ст3 составляет 245 МПа.



а б

Рис. 3. Диаграмма распределения: а) перемещений; б) напряжений

Следовательно, разработанная конструкция обладает достаточной прочностью и жесткостью и может рассматриваться как основа для реализации гибридного многономенклатурного производства с совмещением операций лазерной резки и нанесения защитных покрытий.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания FZWN-2024-0006 по теме «Разработка научных подходов и методов создания многономенклатурных гибридных производств на основе аддитивных технологий с использованием цифровых двойников.

Список литературы

1. Grzesik W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: a review // Journal of Machine Engineering. 2018, vol. 18, no. 4, pp. 5-24. doi.org/10.5604/01.3001.0012.7629.

2. Jiménez A., Bidare P., Hassanin H., Tarlochan F., Dimov S., Essa K. Powder-based laser hybrid additive manufacturing of metals: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, vol. 114, pp. 63-96. doi.org/10.1007/s00170-021-06855-4.
3. Stavropoulos P., Bikas H., Avram O., Valente A., Chryssolouris G. Hybrid subtractive–additive manufacturing processes for high value-added metal components // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020, vol. 111, pp. 645-655. doi.org/10.1007/s00170-020-06099-8.
4. Dezaki M.L., Serjouei A., Zolfagharian A., Fotouhi M., Moradi M., Ariffin M. K.A., Bodaghi M. A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process // Advanced Powder Materials. 2022, vol. 1, no. 4. doi.org/10.1016/j.apmate.2022.100054.
5. Yue W., Zhang Y., Zheng Z., Lai Y. Hybrid laser additive manufacturing of metals: a review // Coatings. 2024, vol. 14, no. 3, p. 315. doi.org/10.3390/coatings14030315.
6. Du W., Li X., Zhang J., Chen C., Zhu S. Review of hybrid additive–subtractive manufacturing of stainless steel for repair applications // Additive Manufacturing Frontiers. 2026, vol. 5, no. 1, p. 200290. doi.org/10.1016/j.amf.2025.200290.
7. Dvorak J., Cornelius A., Corson G., Zameroski R., Jacobs L., Penney J., Schmitz T. L. A machining digital twin for hybrid manufacturing // Manufacturing Letters. 2022, vol. 33, pp. 786-793. doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.07.097.
8. Li Y., Wang Z., Xiao Y., Zhang P. Review of laser-metal additive manufacturing + X hybrid technology // Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2024, vol. 45, no. 13. doi.org/10.7527/S1000-6893.2023.29349.

Сведения об авторах:

Анциферов Сергей Игоревич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой механического оборудования;

Сычёв Евгений Андреевич – старший преподаватель кафедры механического оборудования;

Карачевцева Анастасия Владимировна – конструктор инжинирингового центра цифрового проектирования аддитивных технологий и PLM-систем;

Запара Ульяна Игоревна – студент.