

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БЕЛАРУСИ: КАК ВСЕ НАЧИНАЛОСЬ

ADDITIVE TECHNOLOGIES IN BELARUS: HOW IT ALL BEGAN

УДК 621.77.04

Н.К. Толочко*

*Белорусский государственный аграрный
технический университет*

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2022-2-230-238>

N. Tolochko*

*Belarusian State Agrarian Technical
University*

В последние годы в Беларуси начали находить все более широкое применение аддитивные технологии, или, как их еще называют, технологии 3D-печати. Они вторгаются как в промышленную, так и в социальную сферу. В связи с этим повышается интерес к вопросам истории их развития в Беларуси: когда, где и как они возникли? каковы были первые шаги их становления? Краткому рассмотрению этих вопросов посвящена данная статья.

Принято считать, что практическое освоение аддитивных технологий в мире началось в 1980-е годы. Именно в те годы были выполнены первые коммерчески успешные разработки в области этих технологий (тогда их называли технологиями послойного синтеза, позднее их стали называть технологиями быстрого прототипирования – Rapid Prototyping). Следует заметить, что выходу аддитивных технологий на коммерческий путь развития предшествовал длительный период разработки их различных вариантов, которые, однако, не нашли широкого применения.

Тогда же, в 1980-е годы, началась разработка аддитивных технологий в Беларуси. Инициатором этих разработок был к.т.н. В.И. Горюшкин, заведующий кафедрой технологии машиностроения Витебского технологического института лёгкой промышленности (ВТИЛП) (с 1995 г. Витебский государственный технологический университет, ВГТУ).

С 1982 г. В.И. Горюшкин (совместно с российскими коллегами) выполнял комплекс НИОКР в области технологий послойного синтеза (ТПС) в

Центральном аэрогидродинамическом институте [1]. В рамках проводившихся исследований во ВТИЛП и Московском авиационном институте (МАИ) были разработаны экспериментальные установки для реализации технологий послойного синтеза изделий из листовых материалов.

В 1984 г. была издана книга В.И. Горюшкина «Основы гибкого производства деталей машин и приборов» [2]. В ней описаны схемы реализации процессов послойного синтеза, позволявших создавать изделия из порошков, жидких фотополимеров и листовых материалов, т. е. представлявших собой прообразы, соответственно, таких современных аддитивных технологий, как: Selective Laser Sintering (SLS), Stereolithography Apparatus (SLA) и Sheet Lamination (SL).

В это же время появляются первые коммерчески успешные разработки аддитивных технологий за рубежом. В 1984 г. Ч. Халл (США) разработал SLA-технология, а в 1986 г. основал компанию 3D Systems (США), начавшую выпускать SLA-3D-принтеры. Дальнейшим развитием SLA-технологии стала разработка масочной стереолитографии в 1986 г. в компании Cubital (Израиль) и проекционной стереолитографии в 1987 г. в компании Texas Instruments (США). В 1986 г. К.Р. Декард (США) предложил SLS-технология, которая продвигалась на рынок фирмой Desktop Manufacturing (США). В 1986 г. М. Фейгин (США) подал заявку на патентование одного из вариантов SL-технологии (LOM), коммерциализацией которого занималась фирма Helisys (США).

* E-mail: n.tolochko@hotmail.com (N. Tolochko)

В 1980-90-е гг. В.И. Горюшкин и его коллеги из ВТИЛП занимались изготовлением аэро- и гидродинамических моделей, литейной и штамповой оснастки, «болванов» для формования корпусов малых и спортивных судов и других изделий (рисунок 1), которые получали по SL-технологии из листовых материалов (картона, шпона, пластика) с помощью специально созданной установки (рисунок 2). Однако большинство этих изделий не нашли практического примене-

ния, поскольку промышленные предприятия тогда еще не были готовы к восприятию аддитивных технологий. Одним из исключений было производство обувных колодок, которые были востребованы на обувных фабриках.

В эти же годы во ВТИЛП, наряду с SL-технологией, велись разработки в области SLA-технологии. Итогом этих разработок стала кандидатская диссертация, посвященная созданию компактных производственных систем для послойно-



Рисунок 1 – Образцы изделий, изготовленных из листовых материалов

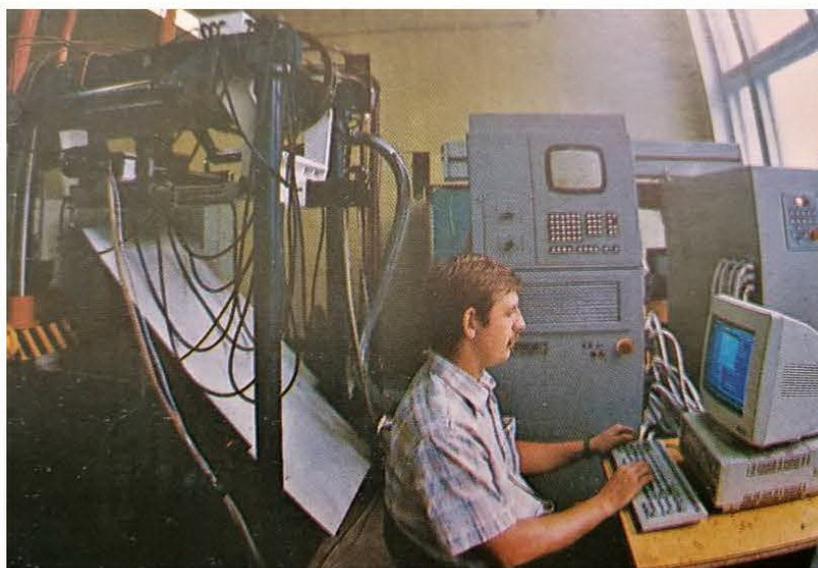


Рисунок 2 – Установка для изготовления изделий из листовых материалов по SL-технологии (ВТИЛП)

го синтеза деталей из фотополимеров, защищенная сотрудником ВТИЛП Д.Н. Свирским в 1994 г. [3]. Диссертация выполнялась в МАИ и ВТИЛП под научным руководством С.В. Скородумова, одного из ведущих российских специалистов в области SLA-технологии.

С 1992 г. по предложению В.И. Горюшкина аддитивные технологии начали разрабатываться в Витебском отделении Института физики твердого тела и полупроводников (с 1994 г. Институт технической акустики, ИТА). Основное внимание уделялось лазерно-порошковым аддитивным технологиям, для исследования которых в ИТА в 1994 г. была создана экспериментальная автоматизированная установка (рисунок 3) [4, 5]. С ее помощью с этого же года начала систематически изучаться уже известная тогда SLS-технология, а также новая, только зарождавшаяся в то время SLM-технология (Selective Laser Melting) (SLM-технология приобрела известность за рубежом после того, как была предложена в Институте Фраунгофера в Германии 1995 г.).

В рамках реализации SLS-технологии подвергали лазерному спеканию двухкомпонентные порошки, из которых один – легкоплавкий служил в качестве связующего агента (системы типа металл – металл, металл – керамика, полимер – металл, полимер керамика). В свою очередь, в рамках реализации SLM-технологии подвергали лазерному сплавлению однокомпонентные металлические порошки (сплавы на основе *Ni, Cu, Fe, Ti*). С помощью этих технологий изготавливали литейную оснастку, электроды-инструменты, демонстрационные образцы изделий (рисунки 4 и 5) [4, 5].

В ходе исследований SLS/SLM-процессов были определены характер поглощения лазерного излучения порошками, особенности теплообмена при лазерном облучении порошков, кинетические закономерности и механизмы формирования межчастичных и межслойных контактов при построении многослойных изделий путем селективной лазерной обработки порошков [6–11].

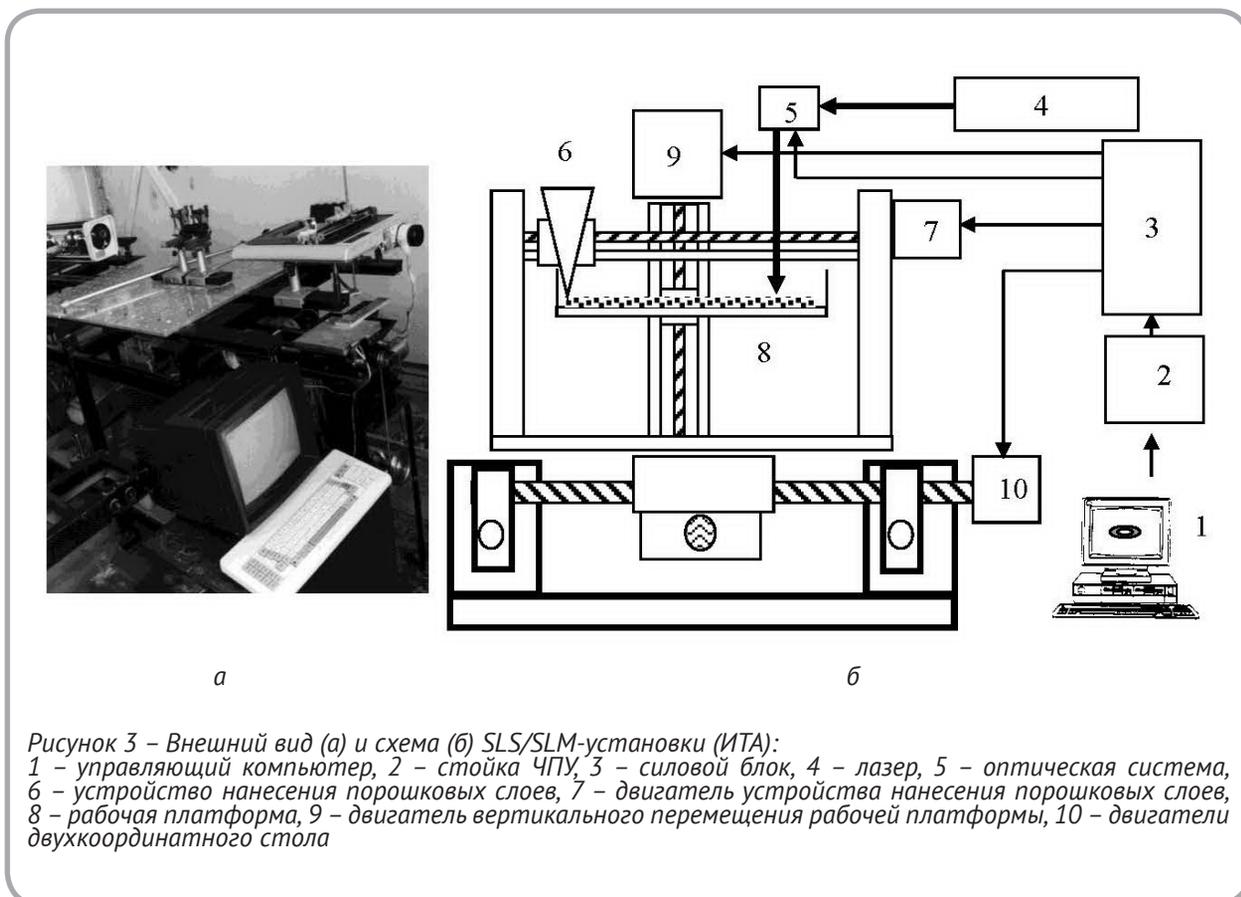




Рисунок 4 – Литейная SLS-модель на основе кварцевого песка и термопластичного полимерного связующего (слева) и чугунная отливка, изготовленная по этой модели методом литья в песчаные формы

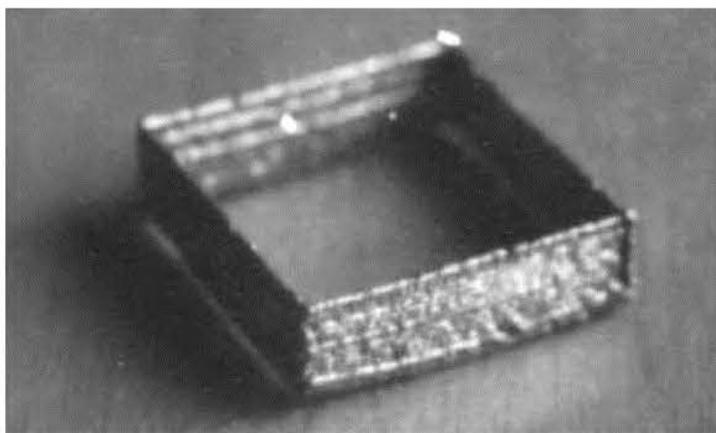


Рисунок 5 – Демонстрационный SLM-образец из Ni-сплава

Особый интерес представлял разработанный в 2001–2003 гг. комбинированный SLS/SLM-процесс изготовления дентальных имплантатов (корней зубов) из порошков на основе Ti-сплава с градиентной структурой, состоящей из прочного сплавленного сердечника и пористой спеченной оболочки, обеспечивавшей срастание имплантата с костной тканью [12]. Для реализации этого процесса в ИТА была создана экспериментальная установка, идея разработки которой была предложена в 1992 г. [13]. Эта установка по принципу работы была подобна современному DLMD-3D-принтеру (Direct Laser Metal Deposition) (DLMD-технология приобре-

ла известность за рубежом после того, как была предложена в Лос-Аламосской национальной лаборатории в США в 1995 г.). Апробация полученных имплантатов на лабораторных животных показала их пригодность для медицинского применения [14].

В 1990-е гг. в ИТА, наряду с лазерно-порошковыми технологиями послойного синтеза, также изучались технологии послойного синтеза, основанные на процессах фотополимеризации [15, 16], в частности, разрабатывались различные варианты масочной и проекционной стереолитографии. Для реализации проекционной стереолитографии в ИТА была создана

экспериментальная установка, в которой было предложено использовать электронно-лучевую трубку в качестве источника модулированного излучения для отверждения жидких фотополимеров [17].

Проводившиеся в ИТА исследования по аддитивным технологиям вызвали интерес в Западной Европе, благодаря чему по данной тематике было выполнено несколько проектов, финансированных в рамках европейской научной программы INTAS (вторая половина 1990-х – первая половина 2000-х годов). После окончания этой программы дальнейшие исследования по аддитивным технологиям не получили необходимой финансовой поддержки в Беларуси, поскольку в те годы и в научных, и в промышленных кругах еще не сформировалось должного понимания актуальности развития этих технологий. В силу сложившихся обстоятельств в первой половине 2000-х гг. работы в области аддитивных технологий в ИТА были прекращены.

Исследования по аддитивным технологиям, выполнявшиеся в ВТИЛП и ИТА в 1980–1990-е гг., а также начале 2000-х гг., не прошли бесследно. До сих пор ссылки на результаты этих исследований встречаются в научных публикациях. В последующие годы аналогичные исследования получили развитие в разных научных центрах Беларуси.

С начала 2000-х гг. в Полоцком государственном университете началась разработка концептуальных принципов организации интеллектуальных производств на основе использования аддитивных технологий (публикации по этой тематике продолжают до настоящего времени). В середине 2000-х гг. в Институте порошковой металлургии (ИПМ) совместно с Институтом физики и Институтом молекулярной и атомной физики (ИМАФ) была создана экспериментальная установка для получения изделий из порошковых материалов как в SLS-, так и в SLM-режиме, на которой был выполнен цикл исследований процессов аддитивного построения. В эти же годы в ИМАФ была разработана модифицированная DLMD-установка.

Исследования в области аддитивных технологий получили особенно заметное развитие во второй половине 2010-х гг. В ИПМ активизировались исследования SLM-технологии (этому

в значительной мере способствовало приобретение SLM-3D-принтера ProX DMP 300); в Белорусском национальном техническом университете – SLS-технологии; в Физико-техническом институте – EBM-технологии (Electron beam melting); в Гродненском филиале ИТМО – FDM-технологии (Fused Deposition Modeling); в Белорусском государственном университете и Институте физиологии – технологии 3D-биопечати.

В последние годы в нескольких университетах, наряду с исследованиями аддитивных технологий, ведется подготовка специалистов по этим технологиям.

Важным показателем уровня развития аддитивных технологий являются масштабы их освоения в промышленной сфере. В настоящее время имеется не один десяток белорусских производственных предприятий, которые применяют аддитивные технологии (в основном это SLA- и FDM-технологии, используемые для целей быстрого прототипирования). Среди них следует отметить компанию по производству бытовой техники «Атлант», которая активно осуществляет 3D-печать изделий из пластика, начиная с 1993 г.

В последние годы в Беларуси наблюдается рост количества малых фирм, специализирующихся в области аддитивных технологий. Они в основном занимаются продажей зарубежных 3D-принтеров и оказанием услуг по 3D-печати. Некоторые из них делают первые шаги в разработке и производстве собственных 3D-принтеров. Особого внимания заслуживает многолетний опыт работы фирмы «МСП Технолоджи Центр», которая была создана в 1993 г. в Минске при поддержке компаний SLM Solutions GmbH и 3D Systems и занимается изготовлением прототипов, оснастки, небольших серий пластмассовых и металлических деталей.

Исследования и разработки в области аддитивных технологий в Беларуси, начавшиеся 40 лет тому назад, продолжают до сих пор. Как отмечалось выше, первой из таких технологий, возникших в Беларуси, стала разновидность SL-технологии, основанная на получении изделий из листовых неметаллических материалов типа картона, шпона, пластика. В последние годы в БГАТУ эта технология получила развитие в новом варианте – на основе использования

листовых металлов. Она применяется для изготовления металлических деталей машин, технологической формообразующей оснастки [18, 19].

Несмотря на долгий путь своего развития, аддитивные технологии в Беларуси сегодня все еще не нашли широкого распространения ни в промышленной, ни в социальной сфере. По масштабам их применения наша страна существенно отстает от ведущих индустриальных стран мира. Одним из путей активизации развития аддитивных технологий является объединение усилий деятельности научных и учебных центров, различных предприятий и организаций, в том числе малого бизнеса, в разработке и практическом освоении этих технологий.

Примером успешного разностороннего применения аддитивных технологий является деятельность ВГТУ, где эти технологии, впервые зародившись много лет назад, продолжают развиваться и в настоящее время. В университете

ведется подготовка студентов по специальности «Производство изделий на основе трехмерных технологий», в рамках которой изучается техника 3D-печати; создана учебно-научно-производственная лаборатория аддитивных технологий, оснащенная разными типами 3D-принтеров, которая не только обеспечивает учебный процесс по новой специальности, но также проводит исследования в области аддитивных технологий, осуществляет 3D-печать изделий по заказам предприятий. Важно отметить, что в университете студенты других специальностей также изучают аддитивные технологии – в рамках соответствующих учебных дисциплин, кроме того, открыты курсы по 3D-моделированию и 3D-печати для детей. Такая целенаправленная подготовка будущих специалистов аддитивных технологий является, несомненно, залогом успешного развития этих технологий в будущем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рыцев, С. Б. (2004), *Разработка и исследование системы компактного интеллектуального производства деталей летательных аппаратов на базе скоростной технологии контурного послойного синтеза*, дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02, Москва, 139 с.
2. Горюшкин, В. И. (1984), *Основы гибкого производства деталей машин и приборов*, Минск, Наука и техника, 222 с.
3. Свирский, Д. Н. (1994), *Технологическое обеспечение компактной производственной системы для послойного синтеза деталей из фотополимеров*, автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.14, Москва, МАИ, 15 с.
4. Толочко, Н. К., Соболенко, Н. В., Мозжаров, С. Е., Ядройцев, И. А., Горюшкин, В. И., Дубовец, В. С. (1995), *Лазерное селективное послойное спекание порошков: проблемы и перспективы*, *Порошковая металлургия*, 1995,

REFERENCES

1. Rytsev, S. B. (2004), *Razrabotka i issledovanie kompaktnogo intellektualnogo proizvodstva detalei letatelnyh apparatov na baze skorostnoi tehnologii konturnogo posloynogo sinteza*, dis. ... kand. tehn. nauk: 05.07.02 [Development and research of a system for compact intelligent production of aircraft parts based on high-speed technology of contour layer-by-layer synthesis, thesis. ... cand. techn. sci.: 05.07.02], Moscow, 139 pp. ,
2. Goryushkin, V. I. (1984), *Osnovy gibkogo proizvodstva detalei mashin i priborov* [Fundamentals of flexible production of machine parts and devices], Minsk, Science and Technology, 222 p.
3. Svirsky, D. N. (1994), *Tekhnologicheskoye obespecheniye kompaktnoy proizvodstvennoy sistemy dlya posloynogo sinteza detaley iz fotopolimerov*, avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.11.14 [Technological support of a compact production system for layer-by-layer synthesis of parts from photopolymers, abstract of the thesis. dis. cand.

№ 3/4, С. 32–37.

5. Толочко, Н. К., Соболенко, Н. В., Мозжаров, С. Е., Ядройцев, И. А., Горюшкин, В. И., Дубовец, В. С. (1995), Технология послойного синтеза – новый метод формообразования порошковых изделий, *Вестник машиностроения*, 1995, № 4, С. 22–25.
6. Tolochko, N. K., Mozzharov, S. E., Sobolenko, N. V. (1995), Main relationships Governing Laser Sintering of Loos Single-Component Metallic Powders, *J. Adv. Mater.*, 1995, № 2, pp. 151–157.
7. Tolochko, N. K., Laoui, T., Khlopkov, Yu. V., Mozzharov, S. E., Titov, V. I., Ignatiev, M. B. (2000), Absorptance of Powder Materials Suitable for Laser Sintering, *Rapid Prototyping J.*, 2000, V. 6, № 3, pp. 155–160.
8. Tolochko, N. K., Arshinov, M. K., Gusarov, A. V., Titov, V. I., Laoui, T., Froyen, L. (2003), Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder, *Rapid Prototyping J.*, 2003, V. 9, № 5, pp. 314–326.
9. Tolochko, N., Mozzharov, S., Laoui, T., Froyen, L. (2003), Selective laser sintering of single- and two-component metal powders, *Rapid Prototyping J.*, 2003, Vol. 9, № 2, pp. 68–78.
10. Tolochko, N. K., Mozzharov, S. E., Yadroitsev, I. A., Laoui, T., Froyen, L., Titov, V. I., Ignatiev, M. B. (2004), Balling Processes during Selective Laser Treatment of Powders, *Rapid Prototyping J.*, 2004, Vol. 10, № 2, pp. 78–87.
11. Tolochko, N. K., Mozzharov, S. E., Yadroitsev, I. A., Laoui, T., Froyen, L., Titov, V. I., Ignatiev, M. B. (2004), Selective Laser Sintering and Cladding of Single-Component Metal Powders, *Rapid Prototyping J.*, 2004, Vol. 10, № 2, pp. 88–97.
12. Tolochko, N. K., Savich, V. V., Laoui, T., Froyen, L., Onofrio, G., Signorelli, E., Titov, V. I. (2002), Dental root implants produced by the combined selective laser sintering/melting of titanium tech. Sciences: 05.11.14, Moscow, MAI, 15 p.
4. Tolochko, N. K., Sobolenko, N. V., Mozzharov, S. Ye., Yadroytsev, I. A., Goryushkin, V. I., Dubovets, V. S. (1995), Laser selective layer-by-layer sintering of powders: problems and prospects [Lazernoye selektivnoye posloynoye spekaniye poroshkov: problemyi perspektivy], *Poroshkovaya metallurgiya – Powder Metallurgy*, 1995, № 3/4, pp. 32–37.
5. Tolochko, N. K., Sobolenko, N. V., Mozzharov, S. Ye., Yadroytsev, I. A., Goryushkin, V. I., Dubovets, V. S. (1995), Layer-by-layer synthesis technology – a new method for shaping powder products [Tekhnologiya posloynogo sinteza – novyy metod formoobrazovaniya poroshkovykh izdeliy], *Vestnik mashinostroyeniya – Vestnik of Mechanical Engineering*, 1995, № 4, pp. 22–25.
6. Tolochko, N. K., Mozzharov, S. E., Sobolenko, N. V. (1995), Main relationships Governing Laser Sintering of Loos Single-Component Metallic Powders, *J. Adv. Mater.*, 1995, № 2, pp. 151–157.
7. Tolochko, N. K., Laoui, T., Khlopkov, Yu. V., Mozzharov, S. E., Titov, V. I., Ignatiev, M. B. (2000), Absorptance of Powder Materials Suitable for Laser Sintering, *Rapid Prototyping J.*, 2000, V. 6, № 3, pp. 155–160.
8. Tolochko, N. K., Arshinov, M. K., Gusarov, A. V., Titov, V. I., Laoui, T., Froyen, L. (2003), Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder, *Rapid Prototyping J.*, 2003, V. 9, № 5, pp. 314–326.
9. Tolochko, N., Mozzharov, S., Laoui, T., Froyen, L. (2003), Selective laser sintering of single- and two-component metal powders, *Rapid Prototyping J.*, 2003, Vol. 9, № 2, pp. 68–78.
10. Tolochko, N. K., Mozzharov, S. E., Yadroitsev, I. A., Laoui, T., Froyen, L., Titov, V. I., Ignatiev, M. B. (2004), Balling Processes during Selective Laser Treatment of Powders, *Rapid Prototyping J.*, 2004, Vol. 10, № 2, pp. 78–87.

- powders, Proc. Ins. Mech. Eng., Part L: *J. Mater. Design and Appl.*, 2002, V. 216, P. 267–270.
13. Толочко, Н. К., Соболенко, Н. В., Сычев, И. Ю., Горюшкин, В. И., Дубовец, В. С., Свирский, Д. Н. (1995), Устройство для изготовления трехмерных изделий из порошковых материалов, *Пат. 2048272 РФ*, МПК 6В22F5/00, С04В35/00/ заявл. 28.09.1992; опублик. 20.11.1995. Бюл. № 32.
 14. Laoui, T., Tolochko, N. K., Artushkevich, A. S., Froyen L. (2004), Bone osseointegration tests performed on titanium dental root implants made 171by laser processing, *Int. J. Product Development*, 2004, Vol. 1, № 2, p. 165.
 15. Толочко, Н. А., Лучина, В. Г., Сычев, И. Ю. (1994), Спектральные и кинетические исследования фотополимеризации жидких олигомерных композиций, *Журнал прикладной спектроскопии*, 1994, Т. 61, № 3-4, С. 274–277.
 16. Толочко, Н. К., Хлопков, Ю. В., Спиридонов, Э. П., Линевич, А. В. (2000), Материалы и источники излучения для стереолитографии (обзор), *Материалы, технологии, инструменты*, 2000, № 3, С. 35–38.
 17. Горюшкин, В. И., Дубовец, В. С., Лучина, В. Г., Сычев, И. Ю., Толочко, Н. К., Хлопков, Ю. В. (1993), Источник модулированного излучения, *Пат. 2106966 РФ*, МПК 6В29С35/08, С08J3/28/; заявл. 23.02.1993; опублик. 20.03.1998. Бюл. № 8.
 18. Толочко, Н. К., Авраменко, П. В., Кравцов, В. Б., Копчик, Д. И. (2022), Проблема ступенчатого рельефа при изготовлении шестерен по аддитивной технологии листового ламинирования, *Агропанорама*, 2022, № 1, С. 2–7.
 19. Толочко, Н. К., Романюк, Н. Н., Сокол, О. В. Штамп для листовой штамповки, *Пат. ВУ 23392*, Опублик. 28.02.2021.
 11. Tolochko, N. K., Mozzharov, S. E., Yadroitsev, I. A., Laoui, T., Froyen, L., Titov, V. I., Ignatiev, M. B. (2004), Selective Laser Sintering and Cladding of Single-Component Metal Powders, *Rapid Prototyping J.*, 2004, Vol. 10, № 2, pp. 88–97.
 12. Tolochko, N. K., Savich, V. V., Laoui, T., Froyen, L., Onofrio, G., Signorelli, E., Titov, V. I. (2002), Dental root implants produced by the combined selective laser sintering/melting of titanium powders, Proc. Ins. Mech. Eng., Part L: *J. Mater. Design and Appl.*, 2002, V. 216, P. 267–270.
 13. Tolochko, N. K., Sobolenko, N. V., Sychev, I. Yu., Goryushkin, V. I., Dubovets, V. S., Svirskiy, D. N. (1995), Ustroystvo dlya izgotovleniya trekhmernykh izdeliy iz poroshkovykh materialov [A device for the manufacture of three-dimensional products from powder materials], *Pat. 2048272 RF*, МПК 6В22F5/00, С04В35/00/ заявл. 28.09.1992; опублик. 20.11.1995. Бюл. № 32.
 14. Laoui, T., Tolochko, N. K., Artushkevich, A. S., Froyen L. (2004), Bone osseointegration tests performed on titanium dental root implants made 171by laser processing, *Int. J. Product Development*, 2004, Vol. 1, № 2, pp. 165.
 15. Tolochko, N. A., Luchina, V. G., Sychev, I. Yu. (1994), Spectral and kinetic studies of photopolymerization of liquid oligomeric compositions [Spektral'nyye i kineticheskiye issledovaniya fotopolimerizatsii zhidkikh oligomernykh kompozitsiy], *Zhurnal prikladnoy spektroskopii – Journal of Applied Spectroscopy*, 1994, Vol. 61, № 3-4, pp. 274–277.
 16. Tolochko, N. K., Khlopkov, Yu. V., Spiridonov, E. P., Linevich, A. V. (2000), Materials and radiation sources for stereolithography (review) [Materialy i istochniki izlucheniya dlya stereolitografii (obzor)], *Materials, technologies, tools*, 2000, № 3, pp. 35–38.

17. Goryushkin, V. I., Dubovets, V. S., Luchina, V. G., Sychev, I. Yu., Tolochko, N. K., Khlopkov, Yu. V. (1993), *Istochnik modulirovannogo izlucheniya* [Source of modulated radiation], *Pat. 2106966 RF*, MPK 6V29S35/08, S08J3/28/; *zayavl. 23.02.1993; opubl. 20.03.1998. Byul. № 8.*
18. Tolochko, N. K., Avramenko, P. V., Kravtsov, V. B., Kopchik, D. I. (2022), The problem of stepped relief in the manufacture of gears using the additive technology of sheet lamination [Problema stupenchatogo rel'yefa pri izgotovlenii shestern po additivnoy tekhnologii listovogo laminirovanii], *Agropanorama – Agropanorama*, 2022, № 1, pp. 2–7.
19. Tolochko, N. K., Romanyuk, N. N., Sokol, O. V. *Shtamp dlya listvoy shtampovki* [Sheet punching die], *Pat. BY 23392*, *Opubl. 28.02.2021.*

Статья поступила в редакцию 27.06.2022 г.