



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-28-35>  
УДК 621.77.04

Поступила 21.08.2024  
Received 21.08.2024

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВЫПЛАВЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИСТОВОГО ЛАМИНИРОВАНИЯ

Н. К. ТОЛОЧКО, П. В. АВРАМЕНКО, В. Б. КРАВЦОВ, А. М. ХАРТАНОВИЧ, Д. И. КОПЧИК,  
Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 99/2. E-mail: n.tolochko1951@mail.ru

Выполнен сравнительный анализ процессов литья по выплавляемым моделям на основе двух технологических подходов: традиционного и модифицированного, основанного на использовании аддитивных технологий. Рассмотрены достоинства и недостатки разных видов аддитивных технологий, применяемых для прямого и непрямого изготовления выплавляемых моделей. Экспериментально изучены особенности получения выплавляемых моделей из воска и парафина с использованием стальных пресс-форм, изготавливаемых по аддитивной технологии листового ламинирования. Обсуждены проблемы реализации этой технологии, связанные с формированием ступенчатого рельефа поверхностей формообразующей полости пресс-формы. Предложен эффективный способ сглаживания этого рельефа путем удаления впадин ступенек посредством замазки.

**Ключевые слова.** Выплавляемая модель, металлическая пресс-форма, аддитивная технология, листовое ламинирование, ступенчатый рельеф.

**Для цитирования.** Толочко, Н. К. Изготовление выплавляемых моделей с использованием аддитивной технологии листового ламинирования / Н. К. Толочко, П. В. Авраменко, В. Б. Кравцов, А. М. Хартанович, Д. И. Копчик // Литье и металлургия. 2024. № 4. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-28-35>.

## MANUFACTURE OF CONSUMABLE PATTERNS USING ADDITIVE SHEET LAMINATION TECHNOLOGY

N. K. TOLOCHKO, P. V. AVRAMENKO, V. B. KRAVTSOV, A. M. KHARTANOVICH, D. I. KOPCHIK,  
Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, 99/2, Nezavisimosti ave.  
E-mail: n.tolochko1951@mail.ru

A comparative analysis of investment casting processes was carried out based on two technological approaches: traditional and modified, based on the use of additive technologies. The advantages and disadvantages of different types of additive technologies used for direct and indirect manufacturing of investment patterns are considered. The features of producing wax and paraffin investment patterns using steel molds manufactured using the additive technology of sheet lamination are experimentally studied. The problems of implementing this technology related to the formation of a stepped relief of the surfaces of the mold cavity are discussed. An effective method for smoothing this relief by removing the recesses of the steps using putty is proposed.

**Keywords.** Consumable pattern, metal mold, additive technology, sheet lamination, stepped relief.

**For citation.** Tolochko N. K., Avramenko P. V., Kravtsov V. B., Khartanovich A. M., Kopchik D. I. Manufacture of consumable patterns using additive sheet lamination technology. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 4, pp. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-28-35>.

Для изготовления металлических деталей машин широко применяются различные виды литейных технологий. Среди них особое место занимает технология литья по выплавляемым моделям (ЛВМ), которая позволяет отливать заготовки с высокой точностью размеров и малой шероховатостью поверхности, благодаря чему существенно снижается или вовсе отпадает необходимость их последующей механической обработки. Вместе с тем эта технология характеризуется значительной сложностью и длительностью реализации, а потому является экономически эффективной в основном в условиях серийного и массового производства, а также при изготовлении ответственных деталей, которые трудно или невозможно получать другими известными путями.

Традиционная ЛВМ-технология включает ряд этапов, в том числе этап получения выплавляемых моделей. Этот этап наиболее сложный и длительный, что обусловлено особенностями получения моделей.

Их создают из модельных составов (на основе воска, парафина и других легкоплавких материалов), которые подают в расплавленном состоянии в литейные пресс-формы, специально создаваемые для каждого нового вида отливаемых деталей с учетом их формы и размеров.

Пресс-формы имеют разъемную конструкцию. Их формообразующими элементами являются матрица и пуансон, при смыкании которых образуется замкнутая полость, соответствующая по геометрии создаваемой литой детали. Основное требование к пресс-формам состоит в том, чтобы они позволяли получать выплавляемые модели, максимально соответствующие по точности размеров и шероховатости поверхности литым деталям. Вместе с тем пресс-формы, используемые в серийном и массовом производствах, где важно обеспечить высокую производительность, должны быть долговечными, так чтобы одна пресс-форма позволяла получать большое количество выплавляемых моделей. Такие пресс-формы делают из стали или алюминиевых сплавов, причем их отдельные составные части, в том числе матрицу и пуансон обычно получают обработкой резанием.

Обычное создание литейных пресс-форм требует много времени, а сами пресс-формы являются дорогостоящими. Поэтому в последние годы для изготовления выплавляемых моделей все шире применяют аддитивные технологии, позволяющие сравнительно быстро и дешево создавать выплавляемые модели и соответственно литые детали на их основе [1], в том числе такие, которые обладают сложной геометрией благодаря использованию передовых методов проектирования, в частности, топологической оптимизации [2].

Известны два принципиально возможных подхода к изготовлению выплавляемых моделей с помощью аддитивных технологий: прямой, когда готовую модель получают непосредственно в результате реализации аддитивной технологии, так что потребность в традиционной литейной пресс-форме вовсе отпадает, и непрямой, когда аддитивную технологию используют для создания специальной литейной формы, с помощью которой затем получают готовую модель.

Для прямого аддитивного изготовления выплавляемых моделей применяется в основном FDM-технология (Fused Deposition Modeling) [1–6], а также в меньшей мере MJM-технология (Multi-Jet Modeling) [6].

Согласно FDM-технологии, волокно из термопластичного полимера протягивается через экструдер, где расплавляется при нагревании, а затем подается в место построения, где затвердевает при охлаждении. Согласно MJM-технологии, термопластичный полимер в расплавленном состоянии впрыскивается через сопло печатающей головки в место построения изделия, где затвердевает при охлаждении. FDM-технология по сравнению с MJM-технологией получила большее распространение при прямом изготовлении моделей благодаря сравнительно низкой стоимости и широкой доступности FDM-3D-принтеров, хотя она характеризуется меньшей точностью изготовления [6].

Прямое изготовление выплавляемых моделей с помощью FDM- и MJM-технологий имеет недостатки: во-первых, полимерные материалы, обычно используемые в этих технологиях, по своим свойствам, как правило, не соответствуют модельным составам, применяемым в ЛВМ-технологии, поэтому для получения выплавляемых моделей приходится специально разрабатывать материалы, которые могут успешно применяться, с одной стороны, в FDM- и MJM-технологиях, и, с другой стороны, в ЛВМ-технологии [3–5]; во-вторых, выплавляемые модели, изготавливаемые с помощью FDM- и MJM-технологий, являются разовыми, т.е. для получения каждой очередной литой детали надо печатать на 3D-принтере новую модель [7].

Для непрямого аддитивного изготовления выплавляемых моделей применяют FDM- и MJM-технологии, а также PolyJet-технологию (разновидность MJM-технологии) [8, 9]. Все эти технологии служат для изготовления мастер-моделей из термопластичных полимеров или фотополимеров. По полученным мастер-моделям делают эластичные литейные формы из силикона, в которые заливают расплавленный модельный состав. Каждую силиконовую форму можно использовать многократно, т.е. с помощью одной формы можно получать не одну модель, а партию моделей, благодаря чему не прямое аддитивное изготовление выплавляемых моделей является экономически более выгодным по сравнению с прямым. Однако силиконовые формы недостаточно долговечны, так что одну такую форму можно использовать для получения лишь небольшой партии выплавляемых моделей (обычно не более 100 шт.) [9].

Нами для изготовления выплавляемых моделей было предложено применять аддитивную технологию листового ламинирования – Sheet Lamination (SL), согласно которой детали создают непосредственно из металлических листов. В частности, применяли один из вариантов этой технологии – CSB-SL-технологию, с помощью которой создавали металлические литейные пресс-формы для

получения выплавляемых моделей, подобные тем пресс-формам, которые используют в традиционной ЛВМ-технологии. Эта технология 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 различными известными способами, например, с помощью механического крепежа [10].

SL-технология характеризуется высокой производительностью, поскольку создаваемое изделие наращивается сразу же готовыми слоями – листовыми выкройками, в то время как в других аддитивных технологиях каждый очередной слой изделия формируется постепенно, последовательно-фрагментарно. Для получения листовых выкроек служат широко распространенные раскройные станки. Они в отличие от обычно применяемых 3D-принтеров разных типов обладают большими размерами рабочей зоны построения, которые определяются размерами раскройного стола и достигают 1–2 м и более, что позволяет получать крупногабаритные изделия.

Особенностью SL-технологии является формирование ступенчатого рельефа на боковой наклонной поверхности изготавливаемой детали, что часто рассматривается как нежелательное явление с учетом требований, предъявляемых к качеству деталей [11]. Возможны две схемы образования ступенек рельефа: в пределах или за пределами соответствующей CAD-поверхности, задаваемой при проектировании детали (рис. 1). Следствием формирования ступенчатого рельефа является погрешность  $\varepsilon$  аддитивного построения детали. Величина  $\varepsilon$  определяется расстоянием между вершинами впадин рельефа и CAD-поверхностью, если ступеньки рельефа образуются в пределах CAD-поверхности (рис. 1, а), и между вершинами выступов рельефа и CAD-поверхностью, если ступеньки рельефа образуются за пределами CAD-поверхности (рис. 1, б).

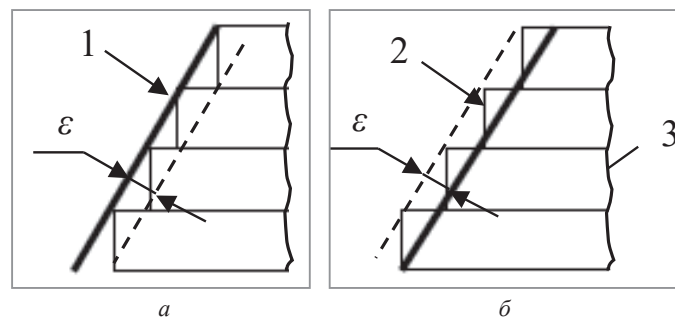


Рис. 1. Схема формирования ступенчатого рельефа на наклонной поверхности SL-детали: в пределах (а) и за пределами (б) CAD-поверхности; 1 – CAD-поверхность проектируемой детали; 2 – ступенчатый рельеф изготовленной детали; 3 – наращиваемые слои детали

Величина  $\varepsilon$  зависит от угла  $\alpha$  наклона боковой поверхности детали, который в свою очередь определяется соотношением высоты  $h$  и длины  $l$  ступенек рельефа (рис. 2):

$$\frac{h}{l} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

Согласно (1), угол  $\alpha$  может изменяться с изменением как  $h$ , так и  $l$ . Соответственно величину  $\varepsilon$  можно определять по следующим формулам:

$$\varepsilon = \frac{hl}{\sqrt{h^2 + l^2}} \quad (2)$$

при  $\alpha = \operatorname{const}$ , т.е. когда  $h$  и  $l$  остаются неизменными либо изменяются одновременно в одно и то же число раз (рис. 2, а, б);

$$\varepsilon = l \sin \alpha \quad (3)$$

при  $h = \operatorname{const}$ , т.е. когда изменяется только  $l$  (и, как следствие,  $\alpha$ ) (рис. 2, а, в);

$$\varepsilon = h \sin \alpha \quad (4)$$

при  $l = \operatorname{const}$ , т.е. когда изменяется только  $h$  (и, как следствие,  $\alpha$ ) (рис. 2, а, г).

Следует заметить, что ступенчатый рельеф типичен для всех аддитивных технологий в силу присущего им послойного характера построения изделий, но у SL-технологии он может быть более значительным, особенно когда изделия формируются из толстых листов материала. Поэтому сглаживание этого рельефа (если он недопустим) является важной задачей на пути совершенствования SL-технологии.

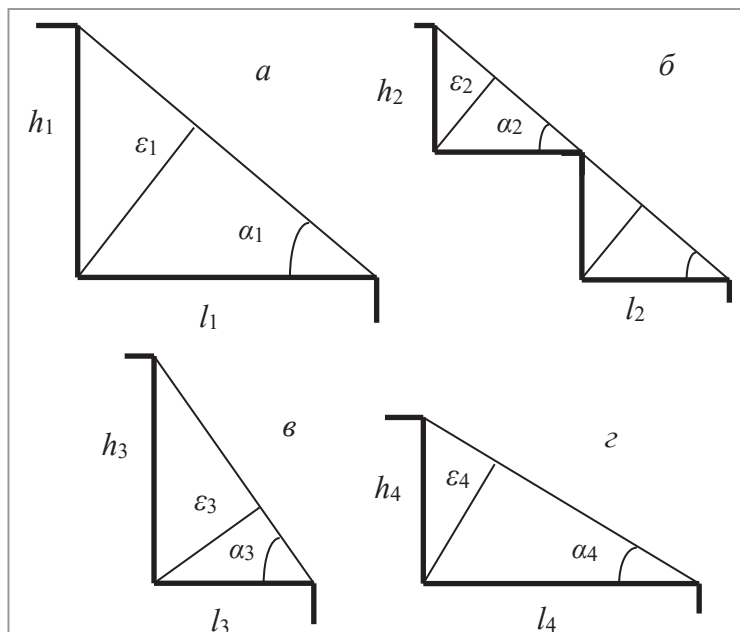


Рис. 2. Графическая интерпретация погрешности аддитивного построения  $\varepsilon$ , обусловленной формированием ступенчатого рельефа поверхности:

$a, б - \alpha_1 = \alpha_2 = \text{const}, h_1 > h_2, l_1 > l_2, \varepsilon_1 > \varepsilon_2$ ;  $a, в - h_1 = h_3 = \text{const}, l_1 > l_3, \alpha_1 < \alpha_3, \varepsilon_1 > \varepsilon_3$ ;  $a, г - l_1 = l_4 = \text{const}, h_1 > h_4, \alpha_1 > \alpha_4, \varepsilon_1 > \varepsilon_4$

Известны разные способы решения этой задачи [11]. Снижать ступенчатый рельеф можно уменьшением толщины слоев, а также рациональным ориентированием слоев, однако нередко этого оказывается недостаточно. Поэтому поверхности построенных деталей, как правило, подвергают дополнительной обработке (пост-обработке), в результате которой может быть достигнуто практически полное удаление ступенчатого рельефа. Пост-обработка осуществляется фрезерованием (на станках с ЧПУ), шлифованием, полированием, дробеструйной и пескоструйной обработкой, лазерным оплавлением и т.д. Все эти способы пост-обработки направлены на удаление выступов ступенек (рис. 3, б). Но в ряде случаев более эффективным может стать удаление не выступов, а впадин ступенек – путем их заполнения соответствующим материалом (рис. 3, в).

Именно такой способ сглаживания ступенчатого рельефа – путем удаления впадин ступенек был реализован в описываемых ниже экспериментах по изготовлению литейной пресс-формы по SL-технологии и последующему получению с ее помощью выплавляемых моделей. Были выполнены две серии экспериментов. В первой серии у изготовленной пресс-формы поверхности рабочей полости имели ступенчатый рельеф, во второй серии – ступенчатый рельеф поверхности рабочей полости был сглажен.

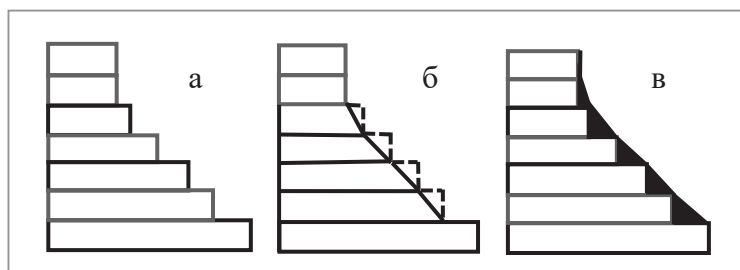


Рис. 3. Ступенчатый рельеф: исходный (а) и сглаженный путем удаления выступов (б) и впадин (в)

Для изготовления литейной пресс-формы по SL-технологии использовали листы из стали Ст3 толщиной 2 мм. Их подвергали контурному раскрою с помощью лазерного станка LaserCUT-1515-6-2-N-RT (ООО «Рухсервомотор», РБ), установленного в лаборатории лазерной обработки БГАТУ. Лазером вырезали не только листовые выкройки определенной конфигурации и размеров, но и отверстия в них, в том числе входное отверстие для подачи модельного состава в литейную полость пресс-формы и выходное отверстие для выхода воздуха и излишков модельного состава из литейной полости в процессе получения выплавляемой модели, а также отверстия, необходимые для последующего соединения выкроек между собой. Полученные выкройки пакетировали. Предварительно поверхности выкроек

шлифовали, чтобы обеспечить их более плотное прилегание друг к другу при пакетировании. В пакеты собирали по отдельности выкройки матрицы и пуансона. Собранные в пакеты выкройки свинчивали с помощью болтов.

На рис. 4 представлено 3D-изображение выплавляемой модели с указанием основных габаритных размеров, а на рис. 5 показаны изготовленные по SL-технологии матрица и пуансон, служащие для получения этой модели. И матрица, и пуансон имели многослойную структуру, образованную пакетированными листовыми выкройками, причем криволинейные формообразующие поверхности и матрицы, и пуансона обладали ярко выраженным ступенчатым рельефом с высотой ступенек, равной толщине выкроек.

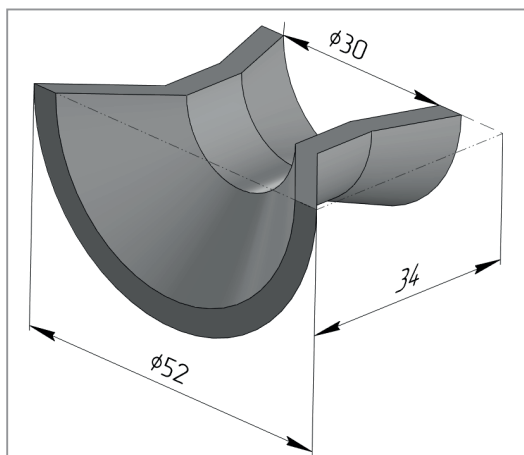
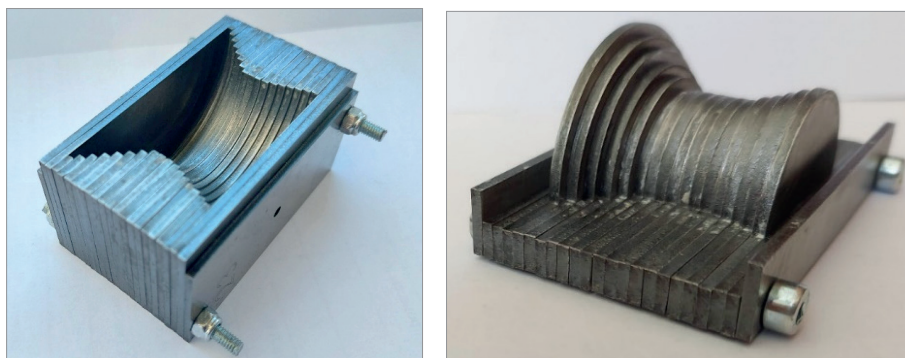


Рис. 4. 3D-изображение выплавляемой модели



*a*

*a*

Рис. 5. Матрица (а) и пуансон (б), изготовленные по SL-технологии

На рис. 6 показана пресс-форма в сборе. Она имела разборную конструкцию и была составлена из матрицы и пуансона, полученных по SL-технологии. В ходе сборки пресс-формы пуансон вставляли в матрицу, так что внутри собранной пресс-формы образовывалась рабочая полость, ограниченная формообразующими поверхностями матрицы и пуансона.

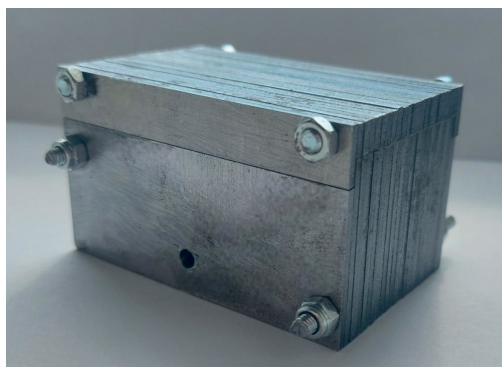


Рис. 6. Пресс-форма в сборе



Прежде чем собирать пресс-форму для последующего получения с ее помощью выплавляемых моделей, формообразующие поверхности матрицы и пуансона покрывали тонким разделительным слоем силиконовой смазки для обеспечения беспрепятственного извлечения готовой модели (без повреждения) из пресс-формы.

При получении выплавляемых моделей в качестве модельного состава использовали парафин или воск. Модельный состав нагревали в термошкафу до температуры расплавления, т.е. до перехода в вязкотекучее состояние (и парафин, и воск нагревали до 85–90 °С). Далее расплавленный модельный состав набирали в шприц и затем подавали из шприца в пресс-форму, так чтобы он заполнял всю рабочую полость пресс-формы, о чем можно было судить по факту начала выдавливания его излишка через выходное отверстие пресс-формы.

На рис. 7 дано пояснение реализации процесса подачи модельного состава в пресс-форму, в частности, показаны пресс-форма и шприц, сопло которого вставлено во входное отверстие пресс-формы.

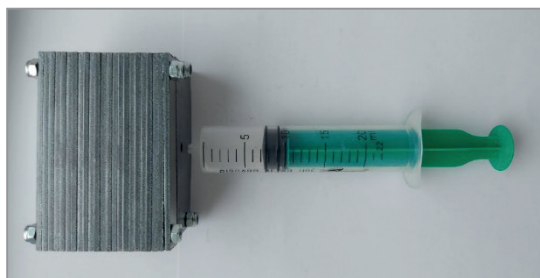


Рис. 7. Пресс-форма и шприц для подачи модельного состава в рабочую полость пресс-формы

После охлаждения пресс-формы вместе с модельным составом до комнатной температуры пресс-форму разбирали и извлекали из нее полученную модель.

На рис. 8 показаны образцы выплавляемых моделей, полученные из парафина и воска с помощью пресс-формы. Поскольку модели отливали в пресс-форме, у которой поверхности рабочей полости имели ступенчатый рельеф, такой же ступенчатый рельеф был отпечатан на поверхности готовых моделей.

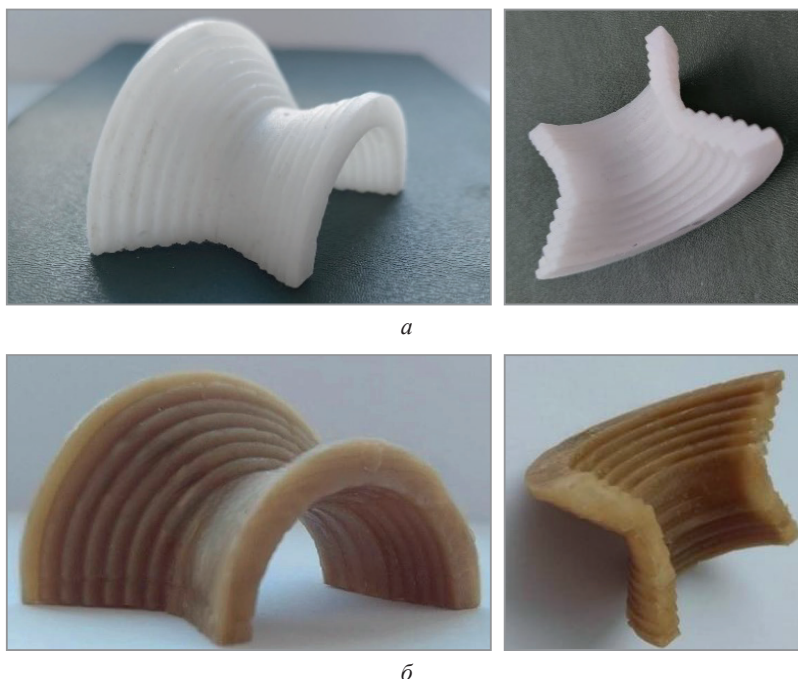


Рис. 8. Выплавляемые модели из парафина (а) и воска (б) с поверхностями, имеющими ступенчатый рельеф

Для получения выплавляемых моделей с гладкой поверхностью проводили сглаживание ступенчатого рельефа формообразующих поверхностей матрицы и пуансона, для чего полностью замазывали впадины ступенек рельефа специальными замазками типа «Быстрая сталь» (Hi-Gear, США) – сверхпрочная полимерная клей-шпатлевка со стальным наполнителем или «Термосталь» (DoneDeal, США) – термостойкий (до 1400 °С) сверхпрочный ремонтный герметик.

На рис. 9 показаны матрица и пуансон, полученные по SL-технологии, у которых формообразующие поверхности являются гладкими благодаря сглаживанию ступенчатого рельефа путем удаления впадин ступенек посредством замазки.

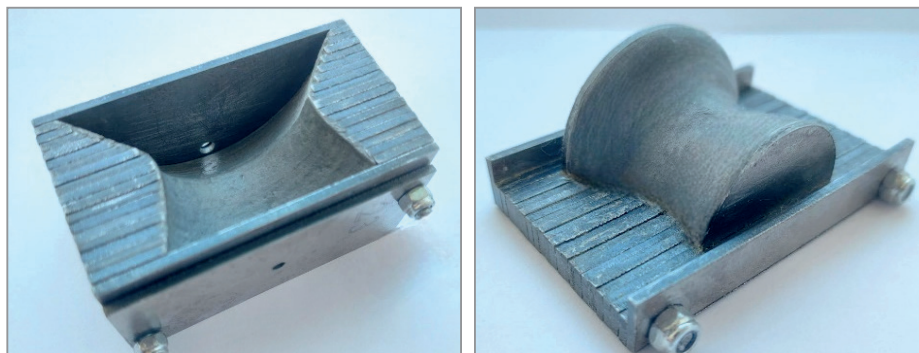


Рис. 9. Матрица (а) и пуансон (б), полученные по SL-технологии, с гладкими формообразующими поверхностями

На рис. 10 показаны образцы выплавляемых моделей из парафина и воска с гладкими поверхностями, полученные с помощью пресс-формы соответственно со сглаженным ступенчатым рельефом поверхностей рабочей полости.

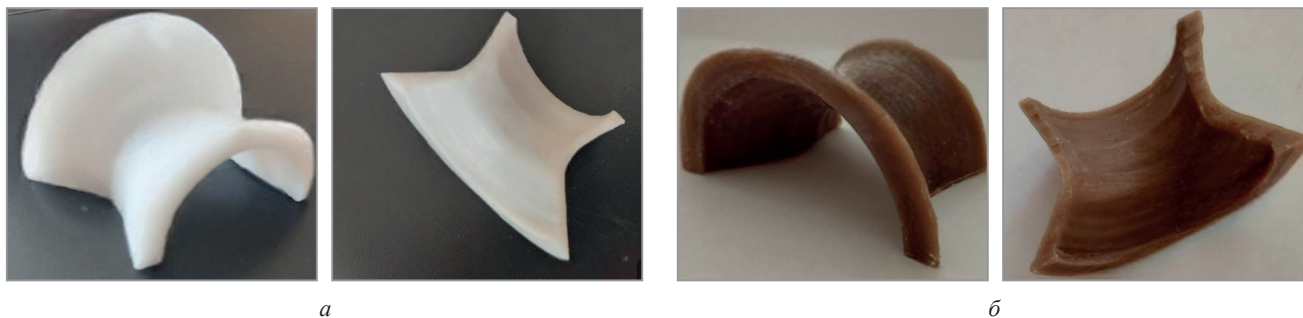


Рис. 8. Выплавляемые модели из парафина (а) и воска (б) с гладкими поверхностями

Таким образом, как показали результаты выполненных экспериментов, SL-технология позволяет сравнительно быстро и дешево изготавливать непосредственно металлические пресс-формы, предназначенные для литья выплавляемых моделей сложной конфигурации. Такие пресс-формы имеют высокую долговечность, так что каждая из них может служить для получения большого количества моделей подобно традиционным пресс-формам, применяемым в ЛВМ-процессах в условиях серийного производства. Апробированный в экспериментах способ сглаживания ступенчатого рельефа формообразующих поверхностей рабочей полости изготавливаемых пресс-форм путем замазывания впадин ступенек рельефа представляет собой эффективный подход к решению проблемы повышения качества поверхности выплавляемых моделей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lost wax casting: from 3d printing to functional parts / A. H. Alami [et al.] // Resourceedings.– 2023.– Vol. 3, iss. 3.– P. 10–16.
2. Design and topology optimization of 3d-printed wax patterns for rapid investment casting / J. Wang [et al.] // Procedia Manufacturing.– 2019.– Vol. 34.– P. 683–694.
3. Взаимодействие модельных составов с пластиковой оснасткой, изготовленной с помощью технологии 3D-печати / К. А. Власова [и др.] // Труды ВИАМ.– 2018.– № 2.– С. 53–61.
4. Balyakin, A. V. Study of FDM technology applications in the casting production of GTE details / A. V. Balyakin, R. A. Vdovin, R. R. Kyarimov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.– 2020.– Vol. 971.– 6 p.
5. Баринов, А. Ю. Повышение эффективности литья в керамические форм за счет аддитивного производства воскополимерных моделей: дис. ... канд. тех. наук: 2.6.3.– Самара, 2022.– 144 с.
6. Свиридов, Д. А. Проблемы использования 3D-печати методом FDM в технологическом процессе литья по выплавляемым моделям / Д. А. Свиридов, Д. Ю. Левин, О. А. Рябинина // Вестник науки и образования.– 2020.– Ч. 2, № 17.– С. 37–39.
7. 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.
8. Кулик, В. И. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учеб. пособие / В. И. Кулик, А. С. Нилов.– СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2018.– 160 с.

9. Разработка методики литья жаропрочных сплавов сложных деталей малоразмерных газотурбинных двигателей с применением аддитивных технологий / В.Г. Смелов [и др.] // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2014. – № 5, ч. 3. – С. 19–24.
10. Толочко, Н. К. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // Вестник машиностроения. – 2020. – № 10. – С. 11–15.
11. Толочко, Н.К. Аддитивные технологии: проблема ступенчатого рельефа поверхности / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // Агропанорама. – 2019. – № 2. – С. 12–16.

## REFERENCES

1. Alami A.H. [et al.] Lost wax casting: from 3d printing to functional parts. *Resourceedings*, 2023, vol. 3, iss. 3, pp. 10–16.
2. Wang J. [et al.] Design and topology optimization of 3d-printed wax patterns for rapid investment casting. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 34, pp. 683–694.
3. Vlasova K.A. [et al.] *Vzaimodejstvie model'nyh sostavov s plastikovoj osnastkoj, izgotovlennoj s pomoshch'yu tekhnologii 3D-pechati [Interaction of model compositions with plastic equipment manufactured using 3D printing technology]*. Trudy VIAM = Proceedings of VIAM, 2018, no. 2, pp. 53–61.
4. Balyakin A.V., Vdovin R.A., Kyarimov R.R. Study of FDM technology applications in the casting production of GTE details. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 971, pp. 6.
5. Barinov A. Yu. *Povyshenie effektivnosti lit'ya v keramicheskie form za schet additivnogo proizvodstva vosko-polimernyh modelej: dis. ... kand. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of casting into ceramic molds through the additive production of wax-polymer models]*. Samara, 2022, 144 p.
6. Sviridov D.A., Levin D. Yu., Ryabinina O.A. Problemy ispol'zovaniya 3D-pechati metodom FDM v tekhnologicheskom processe lit'ya po vyplavlyаемым modelyam [Problems of using 3D printing using the FDM method in the technological process of investment casting]. *Vestnik nauki i obrazovaniya = Bulletin of Science and Education*, 2020, part 2, no. 17, pp. 37–39.
7. Zlenko M.A., Nagajcev M.V., Dovbysh V.M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii: posobie dlya inzhenerov [Additive technologies in mechanical engineering: a guide for engineers]*. Moscow, GNC RF FGUP «NAMI», 2015, 220 p.
8. Kulik V.I., Nilov A.S. *Additivnye tekhnologii v proizvodstve izdelij aviacionnoj i raketno-kosmicheskoy tekhniki: ucheb. posobie [Additive technologies in the production of aviation and rocket and space technology products: textbook. allowance]*. Saint Petersburg, Balt. state tech. univ. Publ., 2018, 160 p.
9. Smelov V.G. [et al.] *Razrabotka metodiki lit'ya zharoprochnyh splavov slozhnyh detalej malorazmernyh gazoturbinnih dvigatelej s primeneniem additivnyh tekhnologij [i dr.]*. *Vestnik Samar. gos. aerokosm. un-ta = Bulletin Samar. state aerospace un-ta*, 2014, no. 5, part 3, pp. 19–24.
10. Tolochko N.K., Sokol O.V. *Metodologicheskie aspekty ocenki effektivnosti additivnoj tekhnologii listovogo laminirovaniya [Methodological aspects of assessing the effectiveness of additive technology for sheet lamination]*. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 2020, no. 10, pp. 11–15.
11. Tolochko N.K., Sokol O.V. *Additivnye tekhnologii: problema stupenchatogo rel'efa poverhnosti [Additive technologies: the problem of stepped surface relief]*. *Agropanorama = Agropanorama*, 2019, no. 2, pp. 12–16.