

Перспективы применения полимерного штамповочного инструмента

А. Д. Куликов, П. А. Петров, И. А. Бурлаков, П. А. Полшков

Представлены результаты исследований, направленных на расширение области применения полимерных материалов. Показана принципиальная возможность изготовления рабочего инструмента для штамповки листовых деталей из пластика методом экструзионной 3D-печати. Приведены результаты моделирования процесса штамповки пластиковым инструментом. Определены контактные напряжения и приведены результаты натурных экспериментов по вытяжке заготовок деталей типа «втулка» инструментом из полимеров марок PLA и ePA-CF.

Ключевые слова:

листовая сталь, вытяжка, сталь 12X18H10T, PLA, ePA-CF

УДК 621.7.043 | ББК 2.5.7, 2.6.4

DOI: 10.22184/2499-9407.2025.40.3.62.67

Введение

Листовая штамповка обладает множеством преимуществ, к основным из которых можно отнести:

- возможность изготовления деталей с минимальной массой при заданной прочности;
- точность изготовления;
- соблюдение формы и размеров;
- коэффициент использования металла, близкий к 100%;
- снижение затрат на последующую обработку.

Листовая штамповка позволяет получать сложные по форме тонкостенные либо массивные прочные детали, которые не могут быть получены иным способом. Разнообразие методов листовой штамповки, применение различных по конструкции штампов и использование соответствующих материалов для их изготовления обеспечивают рентабельность в условиях крупного, серийного, а также мелкосерийного производства [1].

Штампы – точный, сложный и подчас дорогой инструмент. В зависимости от конструктивного исполнения изготовление сложных штампов требует больших единовременных инвестиций на этапе подготовки производства [2]. Снижение затрат обусловлено совершенствованием технологий листовой штамповки при обеспечении требуемого объема производства изделий.

Снижение стоимости формообразующего штампового инструмента в условиях мелкосерийного производства является актуальной задачей. Поэтому не случайно, что когда в начале развития аддитивного производства появилось направление, связанное с быстрым производством инструмента (rapid tooling) [3–6], это обеспечило снижение затрат на изготовление штампового инструмента в случае мелкосерийного и штучного производства.

Быстрое инструментальное производство направлено на производство инструментов, инструментальных

вставок, эталонов (калибров), штампов и пресс-форм [3–9]. К особенностям процесса быстрого изготовления инструмента относят:

- время изготовления инструмента много меньше, чем при изготовлении традиционного инструмента (как правило – в пять раз);
- стоимость изготовления инструмента намного меньше (примерно 5% от стоимости изготовления традиционного инструмента);
- срок службы инструмента значительно меньше, чем у традиционного инструмента;
- поля допусков на размеры инструмента, изготавливаемого по технологии rapid tooling, шире в сравнении с полями допусков на размеры традиционного инструмента, качество поверхности инструмента характеризуется шероховатостью большего размера.

Первые, из известных, исследования и разработки в области применения быстрого инструментального производства в обработке листовых металлов давлением относятся к 1979–1980 годам и связаны с профессором Накагава [10]. Он предложил использовать технологию послойного соединения тонких листовых материалов для изготовления штампов листовой штамповки и пресс-форм. По своей сути данный способ изготовления штампового инструмента и пресс-форм стал прототипом для известной аддитивной технологии LOM (Laminated object manufacturing – изготовление методом ламинирования), появившейся в аддитивном производстве в 90-х годах прошлого века.

В период с 90-х до 2010-х годов расширяется область применения аддитивных технологий при изготовлении штампового инструмента для листовой штамповки [5–8,

11–13], что позволяет обеспечить спрос на изготовление сложных штампованных изделий малыми сериями. Взамен сталей в качестве инструментальных материалов находят применение полимеры (ABS, поликарбонат, ultem, nylon) [12]. Эта тенденция позволила обеспечить сокращение стоимости и времени выполнения при производстве инструментов [5–8, 11]. Применяемые аддитивные технологии для изготовления инструмента из полимерных материалов:

- селективное лазерное спекание (SLS) [7];
- фотополимеризация в ванне (Stereolithography) [5, 6];
- экструзионная технология 3D-печати (FDM/FFF) [15].

Автопроизводители, например, используя вышеперечисленные аддитивные технологии штампов листовой штамповки, имеют возможность изготавливать детали для прототипов новых автомобилей [13–15]. Как отмечается, достигается 80%-ное сокращение затрат времени на разработку и изготовление оснастки и снижение стоимости оснастки на 70% [7, 18]. Экструзионная аддитивная технология (FFF/FDM), применяемая для прямого изготовления штампов [9, 14–17], получает все большее распространение. В качестве материалов для штампов выбирают полимеры марки ABS, поликарбонат, Ultem, Nylon и др.

На рис. 1 показан пример штампа для выполнения формообразующей операции и деталь, полученная после ее выполнения [9]. Материал штампов – поликарбонат, материал детали – листовая сталь марки DC04 (аналог в РФ – сталь 08Ю) и S355MC (сталь термомеханическая для холодной штамповки с высоким пределом текучести, аналог в РФ отсутствует) толщиной 0,8 мм.

Время изготовления штампов (см. рис. 1) по технологии FDM составило 35 ч с применением промышленной установки Fortus. Механические свойства поликарбоната приведены в табл. 1. Ресурс работы штампов – более 100 изделий из стали каждой вышеуказанной марки.

Таблица 1. Механические свойства поликарбоната в соответствии с ASTM D638 и D790 [9]

Характеристика	Стандарт	Значение
Прочность на разрыв (Тип 1, 0,125", 0,2"/мин), МПа	ASTM D638	68
Модуль упругости при растяжении (тип 1, 0,125", 0,2"/мин), МПа	ASTM D638	2300
Удлинение при растяжении (Тип 1, 0,125", 0,2"/мин), %	ASTM D638	5
Прочность на изгиб (Метод 1, 0,05"/мин), МПа	ASTM D790	104
Модуль упругости при изгибе (Метод 1, 0,05"/мин), МПа	ASTM D790	2200

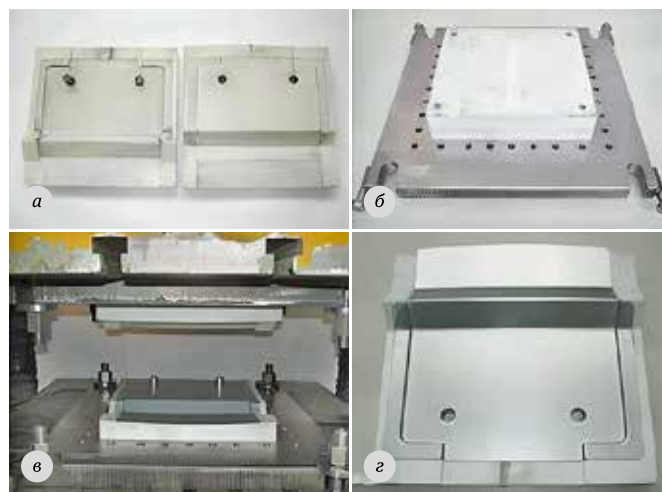


Рис. 1. Пример штампа для формовки детали из листового металла: а – верхний и нижний штампы; б – штампы в сборе; в – штамп в рабочей зоне пресса; г – штампованная деталь в нижнем штампе [9]

Применение инструмента из полимерных материалов, в частности из полилактида PLA, позволяет существенно уменьшить вероятность образования дефектов в виде задигов и риск, что особенно важно при формообразовании заготовок из тонколистового металла [19]. Выполненные рядом ученых исследования показали перспективность применения полимерного инструмента из PLA для формообразующих операций [20].

Из-за отсутствия систематизированных данных особенности быстрого изготовления инструмента, в случае применения инструмента для выполнения операций обработки металлов давлением, требуют всесторонней проверки и дополнительных исследований. Анализ имеющихся литературных данных показал, что одним из основных направлений применения полимерных материалов является изготовление инструмента для гибочных операций [21–23, 28, 29]. Так, инструмент из PLA, изготовленный с применением аддитивной технологии, применяли для формообразования декоративных деталей [24], профилирования тонкостенных алюминиевых листов [25], для импульсной штамповки заготовок из алюминиевых листов толщиной 0,5 мм [26].

В работе [12] показано, что использование штампов из полимерных материалов с высокими механическими свойствами позволяет производить изделия с требуемой размерной точностью. Также приведены минимальные требования к механическим свойствам пластика для изготовления инструмента методом экструзионной 3D-печати (FDM):

- модуль Юнга – 11 МПа;
- прочность при сжатии – 110 МПа.

В работе [12] отмечается, что при изготовлении инструмента для листовой штамповки в малосерийном производстве наиболее пригоден материал PLA.

Выполненные исследования [27] показывают, что материал выдерживает большие нагрузки при сжатии (рис. 2) и можно дополнительно повысить его прочностные характеристики за счет термической обработки при температуре 85 °С. Испытаниями на растяжение установлено, что термическое упрочнение повышает прочностные характеристики полимера до 20%, а при испытаниях на сжатие – от 20 до 25%.

В последнее время появились публикации по следующим темам:

- применение полимерного инструмента для операций вытяжки из листовых заготовок деталей типа стакан [30];

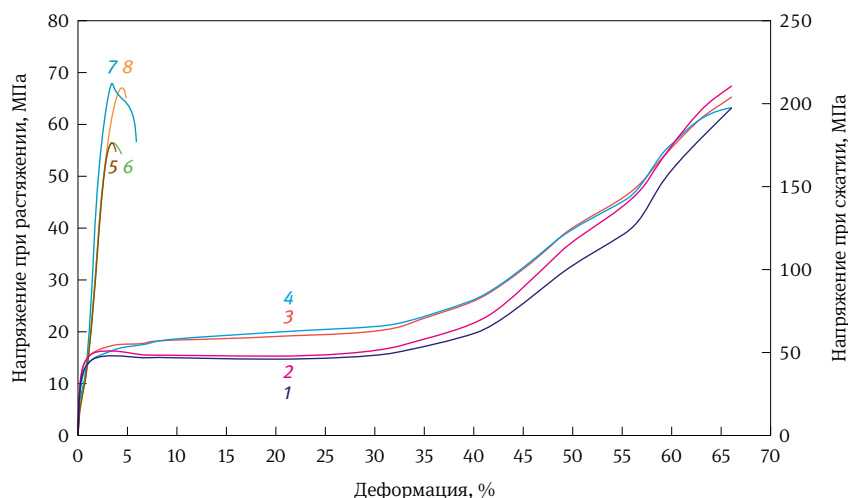


Рис. 2. Напряжения текучести при растяжении и сжатии образцов в зависимости от температуры отпуска: 1 – сжатие без термообработки, 2 – сжатие 70 °С, 3 – сжатие 85 °С, 4 – сжатие 100 °С, 5 – растяжение без термообработки, 6 – растяжение 70 °С, 7 – растяжение 85 °С, 8 – растяжение 100 °С [27]

- применение гибочного инструмента для гибки труб с толщиной стенки 0,8 мм и диаметром от 6 до 36 мм из нержавеющей стали 12X18H10T из полилактида PLA [23, 27, 31, 32];
- изготовление заготовок с применением полимерного инструмента из никелевого сплава марки ХН60ВТ [33].

Настоящая работа направлена на определение области применения полимерного инструмента, изготовленного методом FFF/FDM из полилактида PLA для вытяжки заготовок из листовой нержавеющей стали 12X18H10T толщиной 0,8 мм (рис. 3).

Материалы и методика исследования

Материалом исследования являлись листовые заготовки диаметром 36 мм и толщиной стенки 0,8 мм из нержавеющей стали марки 12X18H10T, химический состав которой (% мас.): Fe – осн., Cr – 18, Ni – 10, Ti – 0,7), поставляемые по ГОСТ 5582-75.



Рис. 3. Схема вытяжки стальных тонкостенных заготовок

Процесс вытяжки моделировали с применением метода конечных элементов (МКЭ) с помощью программы QForm [30] со следующими исходными данными:

- исходной заготовкой является лист из нержавеющей стали 12Х18Н10Т;
- при моделировании принимали, что формообразующий инструмент изготовлен из полилактида PLA, а прижим – из армированного углеволокном нейлона ePA-CF;
- объем заготовки неизменный;
- тип задачи – 3D;
- температура формообразования – 20 °С;
- фактор трения – 0,3, контактное трение по закону Леванова;
- тепловые процессы не учитываются;
- формообразование осуществляли на гидравлическом прессе со скоростью 2 мм / мин.

Ввиду того, что толщина заготовки 0,8 мм, сетка конечных элементов была принудительно измельчена. Изготовление инструмента осуществляли на принтере Raise 3D Pro2 Plus (рис. 4) реализующем экструзионную аддитивную технологию. Результаты моделирования процесса вытяжки заготовок с применением программы QForm без прижима и с прижимом приведены на рис. 5.

Экспериментальная часть

Вытяжка заготовок была осуществлена с применением полимерного инструмента (рис. 6) на гидравлическом прессе с параметрами, соответствующими исходным данным, для которых было выполнено компьютерное моделирование.

Полученные вытяжкой заготовки идентичны заготовкам, произведенным моделированием (рис. 7).

Имеющиеся данные дают возможность говорить, что полимерная оснастка позволяет осуществлять вытяжку заготовок из тонких стальных заготовок. Во избежание образования гофр возможно применение прижима, изготовленного из армированного углеволокном нейлона ePA-CF. По краю заготовки формируются фестоны, характерные для вытяжки анизотропного металла (см. рис. 7 б).

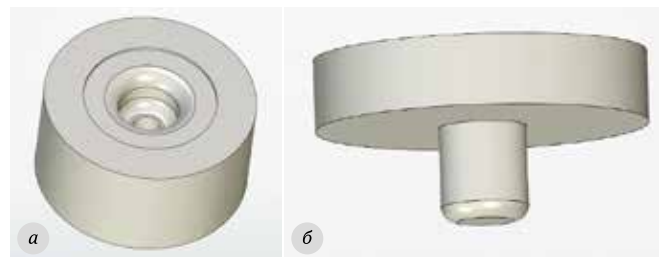


Рис. 4. Твёрдотельные модели матрицы (а) и пуансона (б)

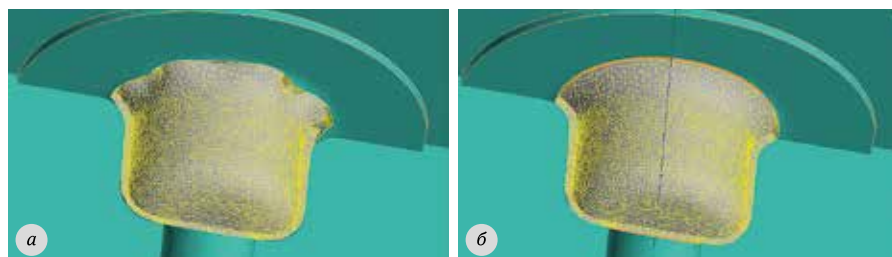


Рис. 5. Заготовки после вытяжки без прижима (а) и с прижимом (б) – моделирование

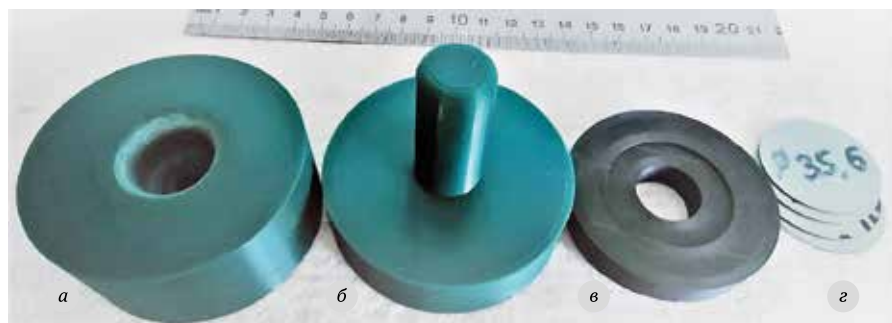


Рис. 6. Экспериментальная полимерная оснастка для вытяжки на гидравлическом прессе: а – матрица из PLA; б – пуансон из PLA; в – прижим из нейлона ePA-CF; з – заготовка из стали 12Х18Н10Т



Рис. 7. Металлические заготовки после вытяжки полимерным инструментом из PLA без прижима (а) и с прижимом (б)

Выводы

Одним из направлений применения аддитивных технологий в обработке металлов давлением является изготовление инструмента из полимерных материалов для формообразующих операций, в частности для вытяжки заготовок из листовых материалов. Это позволяет сократить затраты времени на разработку и изготовление оснастки, а также снизить стоимость штампа.

Анализ имеющихся данных показал, что наиболее приемлемыми для изготовления штамповой оснастки с учетом высоких напряжений, возникающих в процессе штамповки, являются полилактид PLA и нейлон с добавлением 20% углеродного волокна ePA-CF. Данные материалы были использованы при изготовлении штампа для вытяжки изделий типа стакан.

Применение штампа, изготовленного из полимерных материалов методом экструзионной 3D-печати, показало принципиальную возможность выполнения формообразующей операции, обеспечивающей коэффициент вытяжки 1,23–1,4.

Литература

1. Бурдуковский В.Г. Технология листовой штамповки. Учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. 224 с.
2. Юсипов З.И., Каплин Ю.И. Обработка металлов давлением и конструкции штампов. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
3. Gebhardt A., Höttner J.-S. Rapid Tooling. In: Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. PP. 353–394.
4. Afonso D., Pires L., Alves de Sousa R., Torcato R. Direct rapid tooling for polymer processing using sheet metal tools // Procedia Manufacturing. 2017. V. 13. PP. 102–108.
5. Gupta P., Lee J. Rapid prototyping in die manufacturing. Paper presented at The Society of manufacturing Engineers, (1993). PP. 11–13.
6. Jacobs P.F. Stereolithography and other RP&M Technologies: From Rapid Prototyping To Rapid Tooling // ASME Press, New York, NY. (1996).
7. Cheah C.M., Chua C.K., Lee C.W., Lim S.T., Eu K.H., Lin L.T. Rapid sheet metal manufacturing. part 2: direct rapid tooling// Advanced Manufacturing Technology,. 2002. V. 19 (7). PP. 510–515.
8. Lee A., Chung C.W., Ramani K., Schlueter T., Tomovic M.M. WirePath: development of a new method for direct rapid tooling // Proceedings of the 7th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, Saarbrücken (2002).
9. Durgun I. Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool // Rapid Prototyping Journal. 2015. V. 21 (4). PP. 412–422.
10. Nakagawa T., Suzuki K. A low cost blanking tool with bainite steel sheet laminated // Proceedings of 21 International MTDR Conference, 1980.
11. Rosochowski A., Matuszak A. Rapid tooling: the state of the art // Journal of Materials Processing Technology. 2000. V. 106 (1/3). PP. 191–198.
12. Liewald M., de Souza J.H.C. New developments on the use of polymeric materials in sheet metal forming // Production Engineering. 2008. V. 2(1). PP. 63–72.
13. Mueller D.H., Mueller H. Experiences using rapid prototyping techniques to manufacture sheet metal forming tools // Proc. ISATA Conf., Dublin. 9 (2000). PP. 25–27.
14. FDM Deep-Draw Metal Forming Tool. [Электронный ресурс] URL: https://www.stratasys.com/contentassets/d19ded4218c14f749618c6b0fa5be033/ab_fdm_metalformingtool_a4_0323a-2-1.pdf?v=49c1f0 (дата обращения: 24.04.2025).
15. Frohn-Sörensen P., Guecke M., Tuli T.B. et al. 3D printed prototyping tools for flexible sheet metal drawing // Int J Adv Manuf Technol. 2021. V. 115. PP. 2623–2637.
16. Klimyuk D., Serezhkin M., Plokhikh A. Application of 3D Printing in Sheet Metal Forming // Materials Today: Proceedings. 2021. V. 38 (4). PP. 1579–1583.
17. Bhatia C.V., Patel D.R. A Review on Design of Additively Manufactured 3D Printed Tools for Sheet Metal Forming Processes // ECS Trans. 2022. V. 107. P. 13745.
18. Du Z.H., Chua C.K., Chua Y.S., Loh-Lee K.G., Lim S.T. Rapid sheet metal manufacturing, Part 1: indirect rapid tooling // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2002. V. 19 (1). PP. 411–417.
19. Ferreira R.T.L., Amatte I.C., Dutra T.A., Bürger D. Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers // Composites Part B Engineering. 2017. V. 124 (1). PP. 88–100.
20. Савченя А.А., Ермаков А.И. Исследование влияния технологических параметров 3D-печати PLA-пластиком на механические характеристики изделий // Мировая экономика и бизнес администрирование малых и средних предприятий: материалы 16-го Междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 18-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», г. Минск, 26 марта 2020 г. Минск: Право и экономика, 2020. С. 231–232.
21. Залогин М.Ю. и др. Экспериментальное определение и сравнительный анализ характеристик прочности полимеров PPHO30GP, ABS и PLA при различных скоростях деформации // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 3. С. 233–239.
22. Кулик В.И., Нилов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учебное пособие. М.: 2018. 160 с.
23. Бурлаков И.А., Полшков П.А., Петров П.А., Сапрыкин Б.Ю. Гибка труб с применением 3D-напечатанного инструмента // Аддитивные технологии. 2022. № 4. С. 32–34.
24. Звонов С.Ю. Разработка и исследование моделирования в программе QForm процесса гибки изделия типа «Улитка» на инструменте из PLA-пластика // QForm Форум «Моделирование процессов штамповки, прокатки и прессования в QForm». М., 2023.

25. **Aksenov L.B., Kononov I.Y.** 3D Printed Plastic Tool for Al Thin-Sheet Forming // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 337. P. 012053.
26. **Langstädtler L., Intemann A., Herrmann M., Schenck C., Pegel H., Kuhfuss B.** Rapid Tooling for Impulse Forming. ESAFORM 2021. 10.25518/esaform21.2483, (2021), pp. 2483/1–2483/10.
27. **Петров П.А., Бурлаков И.А., Полшков П.А. и др.** Изучение метода повышения прочности филамента PLA // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 1 (034) (2024). С. 60–64.
28. 3D printed press brake forming tools. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.instructables.com/id/3D-Printed-Press-Brake-Forming-Tools> (дата обращения: 24.04.2025).
29. **Nakamura N., Mori K., Abe F., Abe Y.** Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer // Procedia Manufacturing, 15 (2018), 737–742.
30. **Сережкин М.А., Лавриненко В.Ю., Балахонцева Н.А., Тихонова Е.А.** Экспериментальные исследования точности деталей при вытяжке с использованием FDM – инструмента // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 4. С. 435–440.
31. **Петров П.А., Бурлаков И.А., Полшков П.А. и др.** Повышение прочности формообразующего инструмента из полилактида PLA методом закалки // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2023. № 1. С. 58–65.
32. **Бурлаков И.А., Полшков П.А., Петров П.А., Шаболин М.В.** Зависимость геометрической точности труб от технологических параметров гибки инструментом из полилактида PLA // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 3. С. 136–141.
33. **Куликов А.Д., Бурлаков И.А., Петров П.А., Полшков П.А.** Штамповка тонкостенных заготовок с применением инструмента из полилактида PLA // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 12. С. 616–620.
34. **Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А. и др.** Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2019. 383 с.

Авторы

Куликов Алексей Дмитриевич – заместитель начальника цеха, Производственный комплекс «Салют» АО «ОДК», Москва

Петров Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва

Бурлаков Игорь Андреевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, Московский политехнический университет, Москва

Полшков Павел Анатольевич – начальник технологического бюро, Производственный комплекс «Салют» АО «ОДК», Москва



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Пронякин В.И.

Технологичность и метрологичность простановки размеров на чертежах. Практическое пособие

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 276 с. ISBN 978-5-94836-646-3

Рецензент Кафедра «Теория механизмов и машин» факультета «Робототехника и комплексная автоматизация» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Цена 2600 руб.

В книге представлены основы конструирования в машиностроении и приборостроении в части обеспечения технологичности и метрологичности простановки размеров на чертежах.

Сформулированы основные правила простановки размеров при конструировании цилиндрических и призматических деталей. В практической части особое внимание уделено технологичности и метрологичности простановки размеров, системам простановки размеров линейных и криволинейных поверхностей, а также взаимосвязанным требованиям к выбору баз, назначению шероховатости и отклонений формы и расположения поверхностей деталей.

Представлен способ проверки наличия всех размеров на чертеже. Представлены исторические справки. В книге даны многочисленные примеры с объяснениями.

Книга предназначена студентам средних и высших учебных заведений по направлениям подготовки 15.00.00 «Машиностроение», 12.00.00 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии», 16.00.00 «Физико-технические науки и технологии», а также конструкторам, технологам, метрологам, преподавателям, специалистам, работающим с конструкторской документацией.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphere.ru; sales@technosphere.ru