

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.7.043

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-163-170



ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ МЕДИ М1 ПОЛИМЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА PLA

Куликов А.Д.^{1,2}, Бурлаков И.А.^{1,2}, Петров П.А.¹, Полшков П.А.^{1,2}, Деметрашвили И.С.²

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия

²ПК «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены результаты экспериментального исследования формообразования листового проката меди марки М1 с помощью инструмента из полилактида. Формообразующий инструмент изготавливался из полилактида по экструзионной аддитивной технологии (FFF – Fused Filament Fabrication, послойное наплавление пластика). Выполнен анализ литературных источников и выделены примеры применения инструмента из полимерного материала, изготовленного методом 3D-печати для выполнения различных формообразующих операций обработки давлением, что подчеркивает актуальность вопроса, исследуемого в статье. Исследованы и выбраны оптимальные режимы 3D-печати формообразующего инструмента из полимерного материала, важной особенностью которого является 100%-е заполнение при температуре 3D-печати 210°C. В качестве методов исследования выбраны испытание на сжатие, металлографический метод, метод измерения микротвердости, компьютерное моделирование. Полученные результаты показывают принципиальную возможность выполнения гибки заготовок из меди М1 с применением полимерного инструмента. Моделирование операции гибки программой QForm выполнено по результатам натурального эксперимента; получено хорошее согласование между расчетом и экспериментом. Для компьютерного моделирования выбрана модель материала, позволяющая оценить сопротивление деформации в зависимости от температурно-скоростных условий деформирования, из открытых источников. Исследовано влияние температурно-скоростного режима деформирования образцов меди М1 на эволюцию микроструктуры. Микротвердость по Виккерсу деформированных образцов М1 измерялась при нагрузке на индентор 50 г. Выявлены особенности изменения микротвердости в зависимости от скорости деформации. В заключении статьи приводятся рекомендации о возможности применения штампового инструмента из полилактида для мелко- и среднесерийного производства.

Ключевые слова: медь марки М1, компьютерное моделирование, программа QForm, полилактид PLA, 3D-печать, микроструктура, формообразование, листовая заготовка

© Куликов А.Д., Бурлаков И.А., Петров П.А., Полшков П.А., Деметрашвили И.С., 2024

Для цитирования

Формообразование листовых заготовок из меди М1 полимерным инструментом из полилактида PLA / Куликов А.Д., Бурлаков И.А., Петров П.А., Полшков П.А., Деметрашвили И.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 163-170. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-163-170>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SHAPING M1 COPPER SHEET BLANKS USING TOOLS MADE OF POLYLACTIDE PLA

Kulikov A.D.^{1,2}, Burlakov I.A.^{1,2}, Petrov P.A.¹, Polshkov P.A.^{1,2}, Demetrashvili I.S.²

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

² Production Complex Salyut JSC United Engine Corporation, Moscow, Russia

Abstract. The article discusses the results of an experimental study of rolled M1 copper sheets shaping using polylactide tools. The shaping tool was made from polylactide using extrusion additive technology (FFF – Fused Filament Fabrication, layer-by-layer fusion of plastic). An analysis of literary sources was carried out and examples of the use of tools made of polymer material manufactured by 3D printing to perform various shaping operations of pressure processing were highlighted, which emphasizes the relevance of the issue studied in the article. The optimal modes for 3D printing of a shaping tool made of polymer material were studied and selected; an important feature of which is 100% filling at a 3D printing temperature of 210°C. Compression testing, metallographic method, microhardness measurement method, and computer modeling were chosen as research methods. The results obtained show the fundamental possibility of bending blanks made of M1 copper using polymer tools. The bending operation was simulated using the QForm program based on the results of a full-scale experiment; good agreement between calculation and experiment was obtained. For computer modeling, a material model was selected that allows to estimate the deformation resistance depending on the temperature and rate conditions of deformation, from open sources. The influence of the temperature and rate deformation regime of M1 copper samples on the evolution of the microstructure was studied. Microhardness of deformed M1 samples was measured at an indenter load of 50 g according to the Vickers hardness test. Peculiarities of changes in microhardness depending on the deformation rate were revealed. The article concludes with recommendations on the possibility of using polylactide stamping tools for small- and medium-scale production.

Keywords: copper M1, computer modeling, QForm simulation program, PLA polylactide, 3D-printing, microstructure, shaping, metal sheet blank

For citation

Kulikov A.D., Burlakov I.A., Petrov P.A., Polshkov P.A., Demetrashvili I.S. Shaping M1 Copper Sheet Blanks Using Tools Made of Polylactide PLA. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 163-170. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-163-170>

Введение

Детали, полученные листовой штамповкой, занимают важное место в различных отраслях машиностроения, в первую очередь в автомобиле- и авиастроении [1], так как позволяют изготавливать тонкостенные детали, которые зачастую не могут быть получены иным способом. Разнообразные методы штамповки, применение различных по конструкции штампов и использование соответствующих материалов для их изготовления обеспечивают рентабельное производство в условиях как крупного, так и мелкосерийного производства. Однако требуются значительные затраты на изготовление штамповой оснастки, поскольку рынок требует все больше и больше продуктов [2]. С целью снижения стоимости формообразующего инструмента в 70-х годах прошлого столетия были предприняты попытки применения полиуретана в качестве рабочих частей штамповой оснастки в цехах опытного, мелкосерийного и серийного производства [3-5]. Преимуществом таких штампов является простота конструкции и низкая стоимость, составляющая 2-10% от стоимости соответствующих специальных штампов. Как показала

практика, штампы из полиуретана могут быть применены для гибки холодноштамповочных листовых деталей, холодной вытяжки деталей, для раздачи, обжатия, формовки и отбортовки листовых заготовок. Однако этот материал не нашел широкого применения, возможно, вследствие невысокой стойкости и необходимости назначения повышенных припусков при выполнении разделительных операций.

В последнее время появилась информация о применении штамповой оснастки, изготовленной из полилактида (ПЛА) методом 3D-печати. Относительно широкое применение нашел метод 3D-печати, который может быть применен для изготовления инструмента из полилактида для гибки труб диаметром до 28 мм из стали 12X18H10T [6]. Известны разработки и исследования моделированием в программе QForm процесса гибки изделия типа «Улитка» с применением формообразующего инструмента из PLA-пластика [7]. Анализ процесса показал теоретические и практические возможности применения полимерного инструмента для изготовления декоративных деталей из алюминиевого сплава АД31. Имеющиеся литературные данные касаются применения полимерной штам-

повой оснастки для гибочных операций заготовок из мартенситно-старееющей стали DP600 [8], профилирования тонкостенных алюминиевых листов [9], для импульсной штамповки заготовок из алюминиевых листов толщиной 0,5 мм [10]. Анализ отечественной и зарубежной информации позволил установить, что опубликованные материалы касаются преимущественно экспериментальных работ по применению полимерного инструмента. В частности, отсутствуют данные об его эксплуатационной стойкости.

Целью настоящей работы являлось определение возможности применения штампового инструмента из PLA для среднесерийного производства. Для достижения поставленной цели необходимо было выбрать исследуемый деформируемый материал, определить зависимость его сопротивления деформации от термомеханических параметров, осуществить моделирование процесса с целью определения возникающих контактных напряжений, оценить свойства полученных заготовок на уровне микроструктуры металлографическим методом.

Материалы и методы исследования

В качестве исследуемого материала была выбрана медь М1, учитывая, что напряжение текучести технической чистой меди М1 зависит как от величины деформации, так и от ее скорости, в отличие от стальных материалов. В открытых источниках [11] найдены кривые упрочнения меди М1 (рис. 1). Отметим, что для более точной оценки сопротивления деформации меди М1, используемой в данной работе, требуется проведение отдельного исследования, направленного на определение реологических свойств. Однако это выходит за рамки данной статьи.

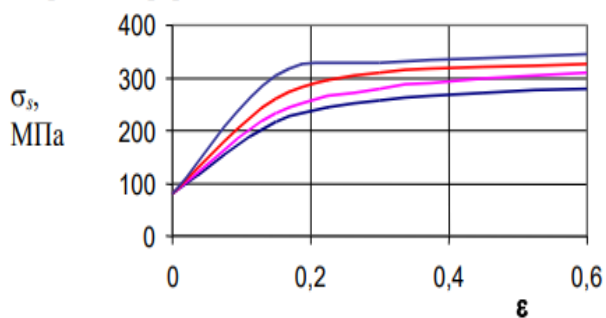


Рис. 1. Кривые упрочнения для меди М1 при комнатной температуре и скоростях деформации, с⁻¹ (снизу-вверх): 0,005; 3; 15; 50 [11]

Fig. 1. Hardening diagrams of copper M1 at room temperature and strain rates (bottom-up): 0,005; 3; 15; 50 [11]

Микротвердость материала образцов определяли на приборе «EMCO TEST DuraScan 20» при нагрузке на индентор 50 г.

Для моделирования процесса гибки был применен программный комплекс QForm 10.3.0 [12].

Исходные данные для моделирования:

– обрабатываемый материал – медь М1 с использованием модели сопротивления деформации, показанной на рис. 1;

– материал инструмента – полимерный материал ПЛА;

– температура заготовки – 20°C;

– температура инструмента – 20°C;

– фактор трения – 0,8;

– скорость перемещения инструмента – 2 мм/с.

Трехмерная модель штампового блока, изготовленного методом 3D-печати, показана на рис. 2.

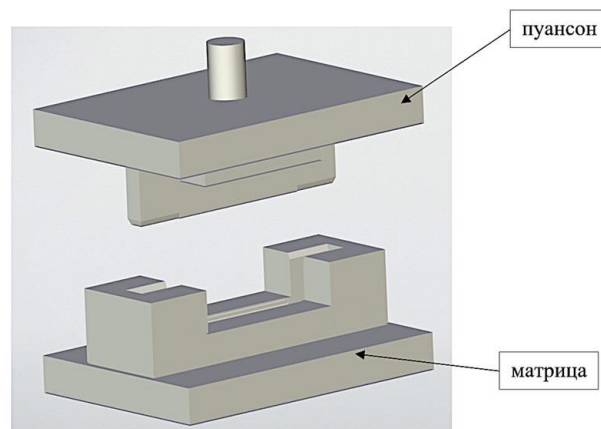


Рис. 2. Трехмерная модель штампового блока
Fig. 2. 3D-model of the stamping unit

В качестве материала для штампового инструмента, изготовленного методом 3D-печати с применением экструзионной технологии FFF (Fused Filament Fabrication) на принтере Raise 3D Pro2 Plus, был выбран полилактид PLA фирмы «ESUN», физико-механические свойства которого представлены в табл. 1. Режим 3D-печати штампового блока представлен в табл. 2. Для достижения максимальной стойкости инструмента был выбран коэффициент заполнения 100% с прямолинейной формой заполнения.

Исходные заготовки для штамповки получали вырубкой в штампе из ленты толщиной 1 мм. Металлографические исследования отштампованных заготовок осуществляли на бинокулярном оптическом микроскопе «Olympus Delta» и «FEI QUANTA 650» с увеличением ×500.

Металлографические исследования эволюции структуры материала заготовок из меди М1 выполнены также на оптическом микроскопе. Для проведения исследования изготавливались цилиндрические образцы размером 10 мм в диаметре и 10 мм высотой. Образцы подвергали сжатию на универсальной испытательной машине модели LFM250 (холодная деформация) и модели LFM50 (теплая деформация, учитывая, что при штамповке наблюдается тепловой эффект пластической деформации). Температура испытаний – 20, 50, 100°C; скорость деформации при каждой температуре – 0,4, 0,01, 0,001 с⁻¹. Сжатие образцов из меди М1 выполнялось без смазки, и величина

относительной деформации составляла 50%; при тепловой деформации инструмент для сжатия нагревался до температуры испытания, то есть до 50 и 100°C.

Таблица 1. Физико-механические свойства ПЛА
Table 1. Physical and mechanical properties of PLA

Параметр	Значение
Плотность материала	1,25 г/см ³
Температура термомодеформации	52°C, 0,45 МПа
Индекс текучести расплава	4 г/10 мин (190 °C/2,16 кг)
Предел прочности	65 МПа
Относительное удлинение при разрыве	12%
Прочность на изгиб	75 МПа
Модуль упругости при изгибе	2102 МПа

Таблица 2. Режимы изготовления образцов
Table 2. Conditions of sample production

Параметр	Значение
Температура сопла, °C	210
Температура рабочего стола, °C	60
Диаметр сопла, мм	0,4
Ширина линии, мм	0,4
Толщина слоя, мм	0,16
Толщина стенки (оболочки), мм	1,2
Обдув, %	100
Ретракт	Да
Плотность заполнения, %	100
Стиль заполнения	Прямолинейный
Поддержки	Нет

Полученные результаты и их обсуждение


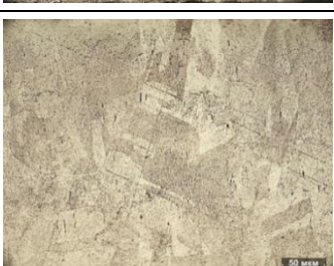
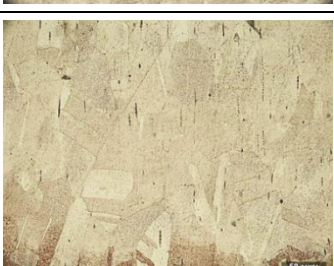
Исследование микроструктуры медных заготовок, осажденных на 50% (табл. 3), показало, что изменение температуры в диапазоне 20–100°C и скорости деформации в пределах 0,4, 0,01 и 0,001 с⁻¹ незначительно влияет на ее изменение, и размер зерен остается в пределах 50–500 мкм.

Микротвердость в центре образцов, деформированных при температурах 20, 50 и 100°C, оставалась практически неизменной и находилась в пределах HV0,05 = 122–128. Следует отметить незначительное влияние на микротвердость скорости деформации при температуре 100°C, которая снижается от 122 до 113 единиц с повышением скорости до 0,4 с⁻¹, что можно объяснить некоторым разогревом материала.

Моделирование с применением модели меди M1, показанное на рис. 3, позволило определить, что напряжения в направлении перемещения инструмента (ось Z) составляет от 40 до 150 МПа. Учитывая, что напряжения текучести при сжатии образцов из PLA достигают 100–150 МПа [6], можно ожидать надежную работу пластикового инструмента. Так как температура нагрева заготовок не превышает 40°C, определение зависимости напряжения от величины деформации было проведено для трех температур: 20,

50 и 100°C. Накопленная деформация в расчете не превышает 0,40 с⁻¹, что соответствует относительной деформации цилиндрических образцов, на которых изучалась эволюция микроструктуры (см. табл. 3).

Таблица 3. Микроструктура деформированных на 50% образцов из меди M1
Table 3. Microstructure of 50% deformed M1 copper samples

Микроструктура образца, увеличение ×500	Температура образца, °C	Скорость деформации $\dot{\epsilon}$, с ⁻¹
	20	0,001
	50	0,001
	100	0,001
	100	0,01
	100	0,4

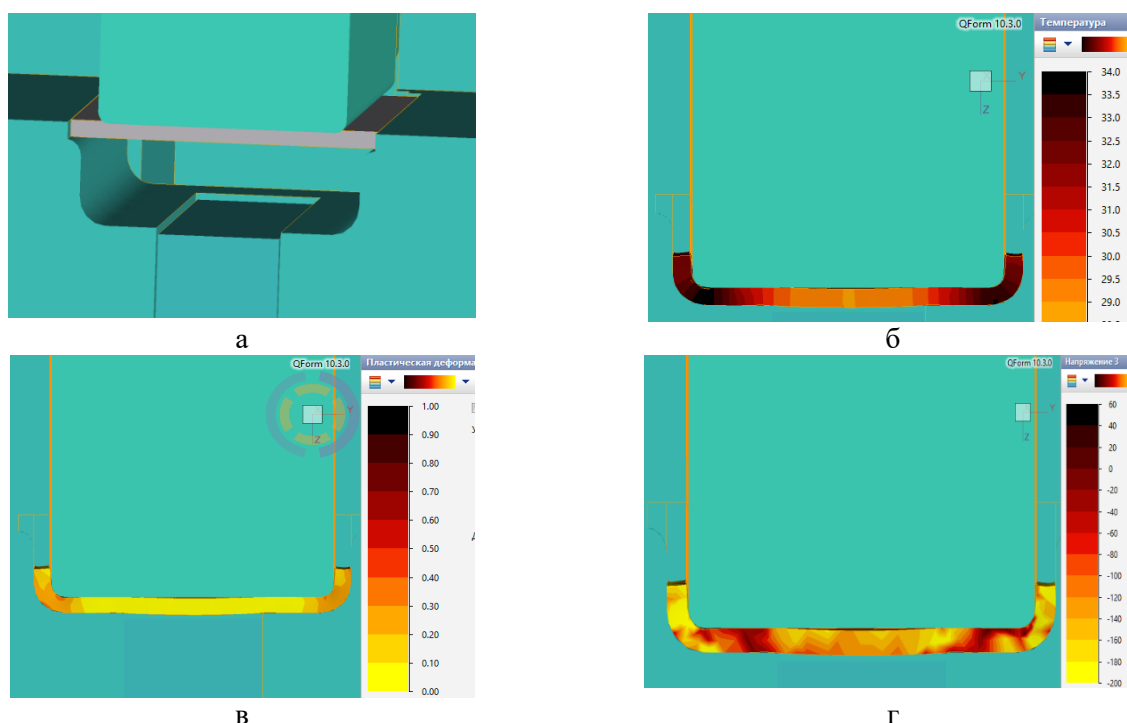


Рис. 3. Моделирование процесса штамповки: а – до деформации; б – после деформации (температура); в – после деформации (величина пластической деформации); г – после деформации (напряжения)
 Fig. 3. Simulation of the stamping process: а is before deformation, б is after deformation (temperature), в is after deformation (plastic deformation), г is after deformation (effective stress)

Разработанная компьютерная модель процесса гибки заготовки из меди М1 в инструменте из ПЛА содержит следующее количество конечных элементов в сетке (табл. 4).

Таблица 4. Количество конечных элементов в сетке для последнего шага расчета процесса гибки

Table 4. Number of finite elements in the mesh for the last calculation step of the bending process

Наименование объекта в модели процесса	Количество приповерхностных элементов	Количество объёмных элементов
Заготовка	17214	45964
Инструмент 1	15584	46759
Инструмент 2	19892	82200
Инструмент 3	1156	2027

Для описания инструмента из ПЛА использовали данные, показанные в табл. 1, и результаты испытаний на сжатия цилиндрических образцов данного полимерного материала, которые после предварительной обработки вводили в базу данных материалов в программе QForm. Таким образом, учитывали поведение инструмента из ПЛА при выполнении гибки металлического материала.

Экспериментальные работы по гибке заготовок из меди М1 проводили с применением штамповой оснастки из ПЛА, установленной на гидравлическом

вытяжном прессе (рис. 4, 5). Контроль геометрических параметров штампованных заготовок осуществляли с помощью универсального мерительного инструмента. Точность измерения составляла $\pm 0,1$ мм. Исходные заготовки и заготовки после штамповки показаны на рис. 6.



Рис. 4. Гидравлический пресс с установленной штамповой оснасткой из ПЛА

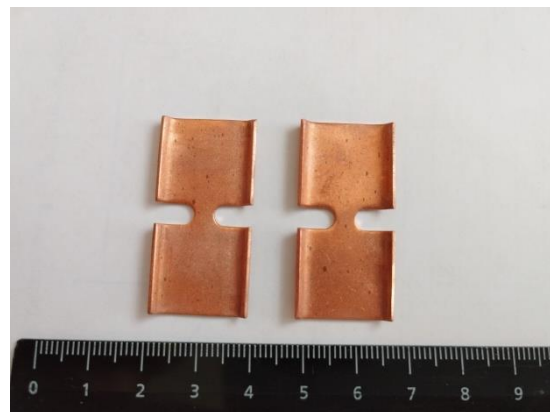
Fig. 4. Hydraulic press with the stamping unit made of PLA



Рис. 5. Штамповая оснастка из ПЛА (укрупненно)
Fig. 5. Stamping unit made of PLA (magnified)



а



б

Рис. 6. Заготовки до штамповки (а) и после деформации (б)
Fig. 6. Blanks before stamping (a) and after deformation (б)

Качество выпущенных деталей соответствовало требованиям чертежа, а геометрические размеры деталей находились в пределах допуска, установленного чертежом. Несмотря на высокие расчетные напряжения, возникающие в процессе формообразования, заметный износ инструмента замечен не был, что было подтверждено стабильными геометрическими параметрами изготовленных деталей. Величина пружинения заготовок при штамповке была близка к расчетной, полученной моделированием.

К геометрическим параметрам отштампованных заготовок предъявляются высокие требования по геометрической точности и шероховатости поверхности. Выполненные исследования позволили установить, что, несмотря на высокие контактные напряжения, возникающие в процессе деформации заготовок, гибочный инструмент из полилактида PLA обеспечивает изготовление заготовок с требуемыми геометри-

ческими параметрами, что позволяет рекомендовать его для более широкого применения в листоштамповочном производстве.

Заключение

1. Анализ напряженно-деформированного процесса, выполненный с применением программного комплекса QForm 10.3.0, позволил определить, что напряжения в направлении перемещения инструмента (ось Z) составляют от 40 до 150 МПа. Учитывая, что напряжение текучести полимерного материала ПЛА составляет 100–150 МПа, можно ожидать надежную работу полимерного инструмента.

2. Исследование микроструктуры показало, что изменение температуры в диапазоне 20–100°C и скорости деформации в пределах 0,4, 0,01 и 0,001 с⁻¹ незначительно влияет на ее изменение; размер зерен остается в пределах 50–500 мкм, что позволяет не

учитывать эволюцию микроструктуры меди при ее деформировании при моделировании процесс гибки.

3. Микротвердость в центре образцов, деформированных при температурах 20, 50 и 100°C, оставалась практически неизменной и находилась в пределах 122–128 HV_{0,05}. Следует отметить незначительное влияние на микротвердость скорости деформации при температуре 100°C, которая снижается от 122 до 113 единиц с повышением скорости до 0,4 с⁻¹, что можно объяснить небольшим разогревом материала.

4. Выполненные исследования позволили установить, что, несмотря на предполагаемые высокие контактные напряжения при гибке, возникающие в процессе деформации заготовок, гибочный инструмент из полимерного материала ПЛА обеспечивает удовлетворительную стойкость, что позволяет рекомендовать его для более широкого применения в листоштамповочном производстве. Например, мелко- и среднесерийном производстве изделий гибкой из листового проката меди М1 толщиной 1 мм.

Список источников

- Development of a framework for the flexibility assessment of automotive production concepts / Kampker A., Bergweiler G., Hollah A., Bickendorf P., Hoffmann F. // *Procedia CIRP*. 2019, no. 81, pp. 34-39.
- Агеев Н.П., Данилин Г.А., Огородников В.П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталей машино- и приборостроения: в 2 ч. Тверь: Герс, 1997-1998. Ч. 1: Механические основы процесса вытяжки. 1997. 336 с. Ч. 2: Проектирование технологических процессов. 1998. 257 с.
- Ходырев В.А. Проектирование, изготовление и эксплуатация штампов с полиуретаном. Пермь: Кн. изд-во, 1975. 365 с.
- Шелухин А.С. Исследование процесса вытяжки эластичной матрицей с политропическим регулированием давления: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1971. 21 с.
- РД 37.002.0490-86. Конструирование штампов листовой штамповки. М.: НПО «НИИТавтопром», 1987. 4.1-2.
- Повышение прочности формообразующего инструмента из полилактида PLA методом закалки / Полшков П.А., Бурлаков И.А., Петров П.А., Сапрыкин Б.Ю. // *Станкоинструмент*. 2023. № 1. С. 58-65.
- Звонов С.Ю. Разработка и исследование моделированием 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.
- Nader Asnafi et al. Design and Validation of 3D-Printed Tools for Stamping of DP600 // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019.
- Aksenov L.B., Kononov I.Y. 3D Printed Plastic Tool for Al Thin-Sheet Forming // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019 (337). (In Russ.)
- Lasse Langstädtler et al. Rapid Tooling for Impulse Forming. <https://www.researchgate.net/publication/350858236> (дата обращения: 19.01.2024).
- Логинов Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы: учеб. пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 136 с.
- Руководство пользователя системы QForm (в электронном виде). ООО «КванторФорм», 2019. <https://www.qform3d.ru/> (дата обращения: 19.01.2024).

References

- Kampker A, Bergweiler G, Hollah A, Bickendorf P, Hoffmann F. Development of a framework for the flexibility assessment of automotive production concepts. *Procedia CIRP*, 2019 (81):34-39.
- Агеев Н.П., Данилин Г.А., Огородников В.П. *Vityajka v shtampah polih tonkostennih detalei mashino- i priborostroeniya: v 2 ch.* [Stretching in dies of hollow thin-walled parts of mechanical and device engineering]. Tver, 1997-1998. (In Russ.)
- Hodyrev V.A. *Proektirovanie, izgotovlenie i ekspluatatsiya shtampov s poliuretanom* [Design, manufacture and operation of polyurethane dies]. 1975, 365 p. (In Russ.)
- Shelukhin A.S. *Issledovanie processa vytyazhki elastichnoj matricей s politropicheskim regulirovaniem davleniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of the stretching process with an elastic die with polytropic regulation pressure. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 1971, 1971. 21 p.
- Konstruirovaniye shtampov listovoy shtampovki* [Construction of dies for sheet-metal forming]. RD, no. 37.002.0490-86, 1987.
- Polshkov P.A., Burlakov I.A., Petrov P.A., Saprykin B.Yu. *Povysheniye prochnosti formoobrazuyushchego instrumenta iz polilaktida PLA metodom zakalki* [Increasing the strength of PLA polylactide molding tools by hardening method]. *Stankoinstrument* [Machin tools], 2023;(1):58-65. (In Russ.)
- Zvonov S.Yu. *Razrabotka i issledovanie modelirovaniem v programme QForm processa gibki izdeliya tipa "Ulitka" na instrumente iz PLA-plastika* [Development and research of bending process of "Snail" type product on PLA-plastic tool by modeling in QForm program]. *QForm Forum "Modelirovaniye processov shtampovki, prokatki i pressovaniya v QForm"* [QForm Forum "Modeling of stamping, rolling and pressing processes in QForm"]. Moscow, 2023. (In Russ.)
- Nader Asnafi et al. Design and Validation of 3D-Printed Tools for Stamping of DP600. 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*

9. Aksenov L.B., Kononov I.Y. 3D Printed Plastic Tool for Al Thin-Sheet Forming. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2019 (337).
10. Lasse Langstädtler et al. Rapid Tooling for Impulse Forming. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/350858236> (Accessed January 19, 2024).
11. Loginov Yu.N. *Med' i deformiruemye mednye splavy: uchebnoe posobie* [Copper and deformable copper alloys: textbook]. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2004, 136 p. (In Russ.)
12. *Rukovodstvo polzatelya sistemy QForm (v elektronnom vide)* [QForm System User Manual (electronic)], OOO "KvantorForm" [QuantorForm Ltd.], 2019. Available at: <https://www.qform3d.ru/> (Accessed January 19, 2024).

Поступила 16.04.2024; принята к публикации 01.07.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 16/04/2023; revised 01/07/2024; published 24/12/2024

Куликов Алексей Дмитриевич – аспирант, заместитель начальника цеха по подготовке производства, Московский политехнический университет, Москва, Россия;
ПК «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия.
Email: a.kulikov@uecrus.com. ORCID 0009-0000-3849-0023

Бурлаков Игорь Андреевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, главный специалист, Московский политехнический университет, Москва, Россия;
ПК «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия.
Email: iaburlakov@gmail.com. ORCID 0000-0002-9427-0217

Петров Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент, Московский политехнический университет, Москва, Россия.
Email: petrov_p@mail.ru. ORCID 0000-0001-5541-5690

Полшков Павел Анатольевич – аспирант, начальник технологического бюро, Московский политехнический университет, Москва, Россия;
ПК «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия.
Email: p.polshkov@uecrus.com. ORCID 0000-0004-7504-6000

Деметрашвили Ирина Сергеевна – инженер-технолог 2-й категории, ПК «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия.
Email: i.demetrashvili@uecrus.com. ORCID 0009-0002-2363-0198

Aleksei D. Kulikov – Postgraduate student, Deputy Head of the Workshop, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia;
Production complex Salyut JSC United Engine Corporation, Moscow, Russia.
Email: a.kulikov@uecrus.com. ORCID 0009-0000-3849-0023

Igor A. Burlakov – DrSc (Eng.), Senior Researcher, Professor, Chief Specialist, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia;
Production complex Salyut JSC United engine corporation, Moscow, Russia.
Email: iaburlakov@gmail.com. ORCID 0000-0002-9427-0217

Pavel A. Petrov – PhD (Eng.), Associate Professor, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.
Email: petrov_p@mail.ru. ORCID 0000-0001-5541-5690

Pavel A. Polshkov – Postgraduate student, Head of the Bureau, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia;
Production complex Salyut JSC United engine corporation, Moscow, Russia.
Email: p.polshkov@uecrus.com. ORCID 0000-0004-7504-6000

Irina S. Demetrashvili – Process engineer, Production complex Salyut JSC United engine corporation, Moscow, Russia.
Email: i.demetrashvili@uecrus.com. ORCID 0009-0002-2363-0198