

Изучение применения технологий аддитивного производства при разработке инструмента для микродеформирования листовых заготовок из цветных металлов и сплавов

М.А. Петров^{1,A}, Д.Х. Чан^{2,A}

Московский политехнический университет

¹ ORCID: 0000-0002-2324-5057, petrovma_mospolytech@mail.ru

² ORCID: 0009-0008-7152-6487, tranhung.bk56@gmail.com

Аннотация

В статье показаны результаты изготовления деформирующего инструмента для выполнения операции микровытяжки. Инструменты и их основные детали были получены по разным технологиям аддитивного производства, из разных материалов (полимеров и металлов). Для получения метрологической информации о точности изготовления отдельных деталей и сборки/подсборки была применена бесконтактная система 3D-сканирования. Установлено, что для совпадения размеров прототипов с чертёжными размерами и попадания в поле допуска, необходимо проектировать исходную 3D-модель с учётом особенностей технологии 3D-печати, механической обработки, а также эксплуатационных характеристик инструмента, которые могут быть получены по результатам испытаний на износ.

Ключевые слова: 3D-печать, FFF, SLM, LCD, микродеформирование, медь М1, латунь Л63, алюминий и алюминиевые сплавы, износ поверхности.

1. Введение

Представление о новых прикладных, производственных технологиях изменяется по мере развития фундаментальных исследований. С появлением высокотехнологичных отраслей, например, микроэлектронной промышленности, в технологиях заготовительного производства стали выделять направление по изготовлению микродеталей и изделий. Лавируя между размером изделий и их требуемым количеством, общая доля заготовительного производства не уменьшилась. Наоборот, массовое производство микродеталей заставляет более тщательно подходить к разработке производственной технологии, чтобы не допустить большого процента брака. Малоизученным направлением остаются процессы микродеформирования или микроштамповки. Основной фундаментальной предпосылкой для разработки технологии микроштамповки остаётся уравнение Холла-Петча, основывающееся на теории дислокаций, согласно которому с уменьшением размера зерна происходит существенный рост прочностной характеристики изделия, согласно уравнению (1), для определённой степени деформации (ϵ), что приводит к снижению пластических свойств [1, 2]. В работе [3] рассматривается изменение пластических свойств заготовок из ленты, толщиной 20, 50, 150 и 200 мкм, описываемых кривыми текучести (рис. 1). Видно, что при определённом значении отношения толщины заготовки к среднему размеру зерна (t/d) графики перестают быть эквидистантны друг другу и наблюдается их пересечение или нарушается порядок следования (случаи и области, отмеченные зелёным прямоугольником с прерывистой границей), что указывает на изменение тенденции в пластическом поведении материала с

изменением геометрических размеров. Такие явления носят названия «размерные эффекты» (size effects).

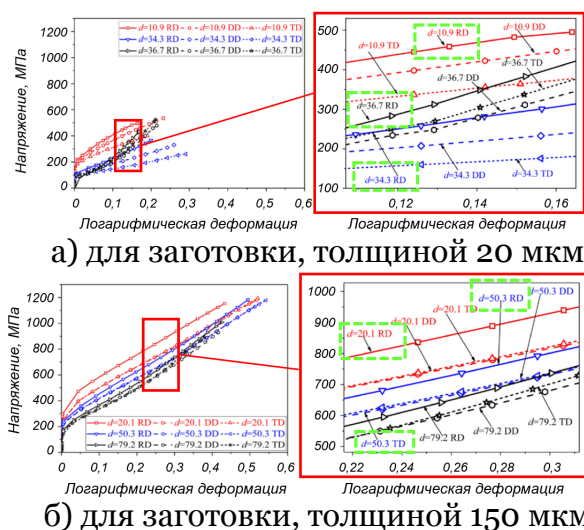


Рис. 1. Примеры полученных кривых текучести для нержавеющей стали SUS304 [3]

Иными словами, существует минимальный размер зерна, разрушение которого требует достаточно высоких напряжений. Соответственно, пластичность металлического образца обусловлена дефектами поликристалла, являющегося совокупностью большого числа кристаллитов или зёрен, имеющих разный размер. Так как размеры зёрен могут изменяться в диапазоне макро- (до 1 мм), микро- (от 1 мм до 1 мкм) и нано-шкал (от 1 мкм до 1 нм), а также иметь промежуточные (мезо-) уровни, то встаёт вопрос об изучении технологических особенностей процесса деформирования на каждом из уровней. Размеры изделий, которые могут быть противопоставлены размеру зерна, могут быть также соотнесены к одному из указанных размерных уровней. Обычно, переход от микро- к макроуровню характеризуется способностью наблюдателя рассмотреть изделие без микроскопа. Наш глаз способен увидеть деталь, размером с пылинку, однако её форму или морфологию без микроскопа оценить уже будет сложно.

В связи с этим появляются отдельные научные направления по изучению материалов и технологий на разных размерных уровнях. Для изделий микро-уровня в англоязычном пространстве существуют такие термины, как microforming (микродеформирование), microstamping (микроштамповка), miniaturized (миниатюрный) и другие [4–6]. Сложность изготовления малоразмерных изделий заключается в необходимости применения дополнительных средств объективного контроля процесса и манипуляции или позиционирования (размещение в рабочей области, извлечение из штампа и перенос на другую позицию или в тару), а также специализированного оборудования. Изготавливаемые способом микродеформирования детали могут быть как листовыми, так и объёмными [7]. На рис. 2 показаны полученные авторами статьи детали: образцы пластин, полученных формовкой (неглубокой вытяжкой), и стаканчиков, полученных из разных материалов с разным коэффициентом масштабирования (подобия) исходной геометрии (λ). Для исследования использовались листовые заготовки, толщиной 0,1 мм, из меди М1, латуни Л63 и алюминия А5 (ДПРНМ), согласно ГОСТ 618-2014. Для изучения влияния зазоров использовалась алюминиевая фольга, согласно ТУ 1811-005-53974937-2004 и ГОСТ 745-2014, толщиной 11 и 25 мкм, складываемая в несколько раз для получения требуемой толщины заготовки. Отчётливо видно, что конструкционные материалы ведут себя различно в процессе их деформирования, в зависимости от коэффициента подобия. Складки или гофры в области фланца указывают на недостаточную силу прижима фланцевой области заготовки в процессе деформирования (рис. 2в).

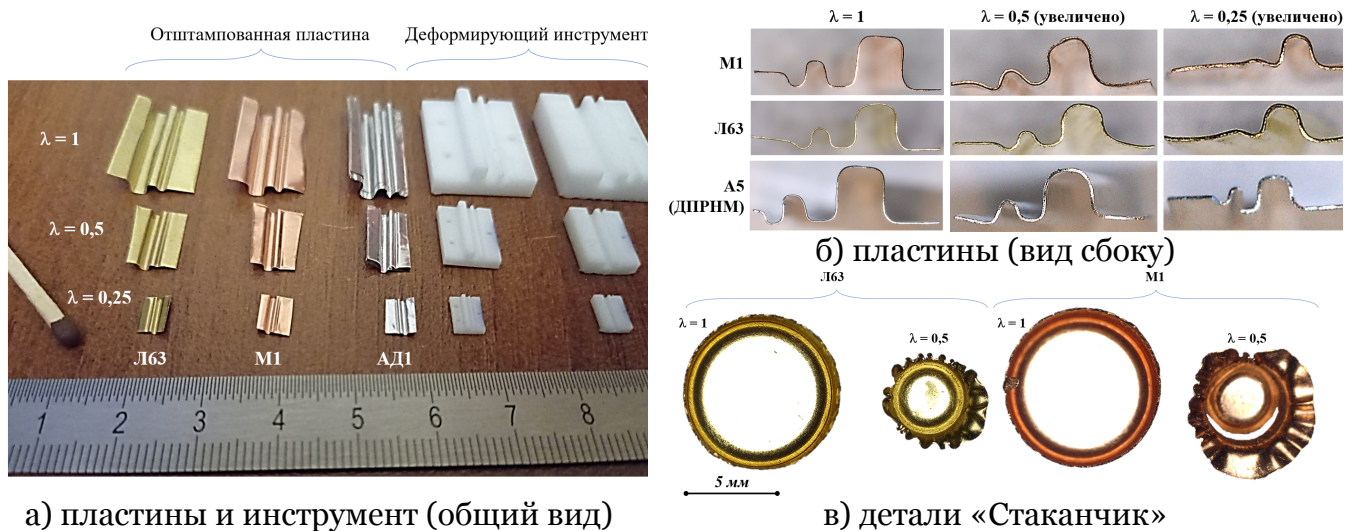
$$\sigma_T = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

где σ_T – предел текучести материала, МПа; σ_0 – напряжение, необходимое для инициализации движения дислокаций, напряжение, которое характеризует меру межзёрненного трения (например, для меди $\sigma_0 = 20...25$ МПа, для алюминия $\sigma_0 = 20$ МПа, для титана $\sigma_0 = 80$ МПа [8, 9]); k – коэффициент упрочнения или константа материала (например, для меди $k = 0,11...0,14$ МПа \times м^{0,5}, для алюминия $k = 0,04$ МПа \times м^{0,5}, для титана $k = 0,4$ МПа \times м^{0,5} [8, 9]); d – средний размер зерна или кристаллита, мкм.

Для реализации процесса микроштамповки требуется наличие исходной заготовки заданной толщины и диаметра, деформирующего инструмента, а также совокупности технологических параметров, определяющих граничные условия, например, температура окружающей среды, коэффициент трения на контактной поверхности и т.д. Инструмент является дорогостоящим компонентным звеном в этой цепи.

Рабочая часть инструмента обладает сложным профилем и не всегда его изготовление экономически целесообразно традиционным способом, механической обработкой (субтрактивные технологии, *subtractive technologies*). Кроме этого, технологии механической, лазерной или электрохимической микрообработки весьма дороги и требуют специализированного оборудования. В XXI веке, благодаря развитию аппаратной и программной частей, стало возможным послойное создание прототипов изделий, что снижает расход материала и позволяет изготавливать сложные изделия.

Эти технологии, получившие название аддитивные технологии (*additive technologies*) или 3D-печать, работают как с металлическими, так и с полимерными материалами. На рис. 3 показан график, отражающий преимущество изготовления сложных прототипов методами аддитивного производства (АТ) по сравнению с методами субтрактивного производства (ТТ). Получаемые прототипы обязательно подвергаются пост-обработке, в большей или меньшей степени. Именно это обстоятельство позволяет сделать выбор либо в пользу традиционных, либо в пользу аддитивных технологий.



а) пластины и инструмент (общий вид)

в) детали «Стаканчик»

Рис. 2. Примеры полученных микроизделий: плоские (а, б) и осесимметричные (в) детали

Вместе с преимуществом построения сложной геометрии прототипа возникает и недостаток аддитивных технологий, заключающийся в том, что прототип получает текстурированную поверхность, обусловленную различным способом построения объекта, стратегией послойной обработки или нанесения материала, что зависит как от технологии 3D-печати, так и от параметров управляющей процессом печати программы, и не позволяет применять прототип сразу после печати, а требует некоторых доделочных операций или пост-обработки.

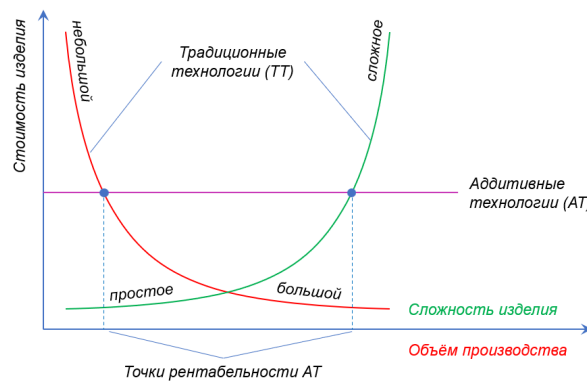


Рис. 3. График сравнения АТ и ТТ

Текстурирование поверхности деформирующего инструмента может как улучшить, так и ухудшить технологичность процесса микроштамповки. Так, микрорельеф поверхности влияет на коэффициент контактного трения [10] и, соответственно, на минимальный и/или максимальный коэффициент микровытяжки листовой заготовки, силу прижима фланца и другое. Также, в зависимости от технологии 3D-печати имеет место отклонение геометрических размеров от размеров исходного чертежа [11].

В работах [12, 13] представлены результаты изготовления детали «Стаканчик» при помощи традиционного инструмента, а также инструмента, выполняющего совмещенную операцию микровырубki и микровытяжки. Авторами этих работ был спроектирован и изготовлен специальный инструмент, полученный по технологии 3D-печати металлическим порошком (SLM) жаропрочной стали, с высоким содержанием кобальта (стеллит 21), показанный на рис. 4. В качестве материалов детали были рассмотрены листовые заготовки толщиной 20...50 мкм из фосфористой бронзы, нержавеющей стали и титана. Внешний диаметр детали «Стаканчик» составлял $\varnothing 1,06$ мм.

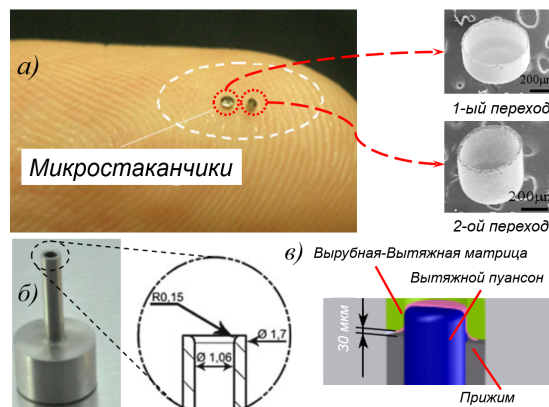


Рис. 4. Микродетали (а) и деформирующий инструмент (б, в)

Полученная равномерная мелкозернистая структура стеллита 21 и мелкая фракция карбидов позволила существенно повысить срок службы инструмента и получить листовые микродетали без разрушений. Однако, следует отметить, что этому также способствовал правильный выбор как смазочного вещества для снижения контактного трения, так и защитного покрытия инструмента, снижающего интенсивность износа поверхности.

В работе [14] применяется технология микропечати или SL μ M (Selective Laser micro Melting), позволяющая получать детали с разрешением 50 мкм и с высокими прямыми стенками детали на микроуровне, с целью изготовления, например, медицинских игл для переноса лекарственных веществ (рис. 5а) или бифуркационных стентов (рис. 5б) [15].

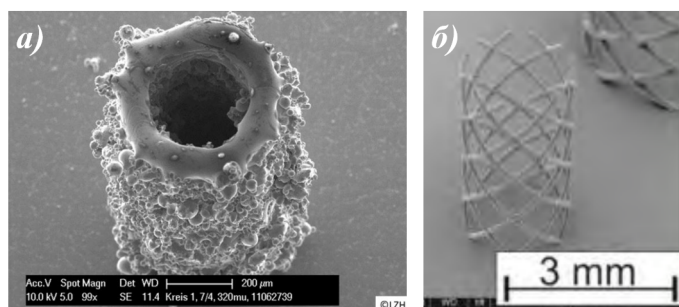


Рис. 5. Детали биомедицинского назначения, полученные по технологии SL μ M: игла (а) и стент (б)

2. Изготовление деформирующего инструмента

Процесс микровытяжки выполнялся по схеме вытяжки дном вниз, т.е. деталь ориентируется таким образом, что её донная часть находится внизу при микровытяжке. На рис. 6 показаны варианты исполнения деформирующего инструмента.

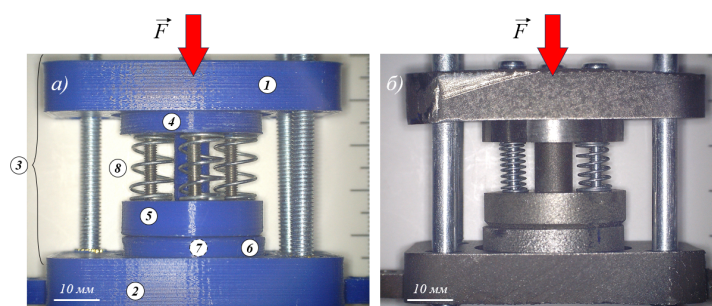


Рис. 6. Деформирующий инструмент для микровытяжки в сборе: полимерный (а) и металлический (б) варианты исполнения.

Инструмент состоит из верхней (1) и нижней (2) плит, направляющих втулок и колонок (3), пуансона и пуансонодержателя (4), прижима (5), матрицедержателя (6) и матрицы (7), располагается внутри по центру матрицедержателя, а также упругого элемента в виде пружин сжатия (8).

Были рассмотрены три технологии 3D-печати. Для изготовления металлического инструмента применялись технологии DMLS и SLM. Для изготовления полимерного инструмента применялись технологии FFF и LCD. Краткая сводная информация, сопоставляющая технологии печати и материалы, представлена в табл. 1. В качестве материалов для металлической 3D-печати рассматривались титановый сплав (BT6), нержавеющая сталь (03X17H12M2 и AISI316L) и алюминиевый сплав (AlSi10Mg).

Для изготовления полимерных прототипов деталей инструмента методом экструзионной печати использовался полиэтилентерефталат-гликоль (ПЭТГ), а для метода масочной фотополимерной печати – базовый фотополимер (БФП), а также керамоподобный фотополимер (КПФП). Далее исследование проходило по схеме, представленной на рис. 7.

Табл. 1. Краткая характеристика применяемых технологий 3D-печати

Название технологии	Производитель оборудования	Материал
DMLS	3D Systems	BT6, AlSi10Mg (аналог АК9)
SLM	3DLAM	03X17H12M2
FFF	Anycubic	ПЭТГ
LCD	Crealty-Halot	БФП, КПФП

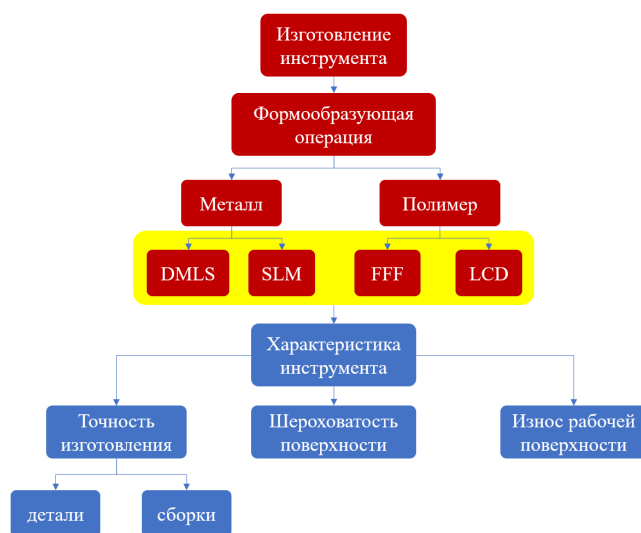


Рис. 7. Схема проведения исследования

Технология 3D-печати экструзионного типа FFF (Fused Filament Fabrication) заключается в послойном добавлении полимерного материала, подающегося из катушки с полимерной проволокой $\varnothing 1,75$ мм, проходящего через горячую зону и выдавливающегося через сопло экструдера, диаметр которого равен $\varnothing 0,4$ мм, что на $\sim 77\%$ меньше исходного диаметра проволоки. Выращивание прототипа ведётся по направлению снизу-вверх. Фотополимерная 3D-печать по масочной технологии (Liquid-Crystal Display) подразумевает вырост прототипа из вязкой фотополимерной композиции с отверждением УФ-излучением, проходящего через жидкокристаллическую матрицу, на которой генерируются сечения профиля, согласно управляющей программе 3D-принтера, работает по схеме сверху-вниз. Технологии лазерного сплавления металлических порошков SLM (Selective Laser Melting) и DMLS (Direct Metal Laser Sintering) позволяют получать металлические прототипы по схеме выроста снизу-вверх за счёт расплавления лучом лазера материала и его кристаллизации по сечениям, согласно управляющей программе (gcode).

По результатам любой 3D-печати выполнялась пост-обработка, заключавшаяся в удалении поддержек, промывки в изопропиловом спирте и воде (только для LCD), снятии заусенцев и фасок, нарезании резьбы и/или установки резьбовых вставок и втулок, термообработки (только DMLS) и другое.

На рис. 8 представлены результаты 3D-печати пуансонов. С увеличением диаметра пуансона его поверхность кажется более гладкой. Действительно, уменьшение размера детали влияет и на время воздействия лазерного луча на поверхность металлического порошка. При одних и тех же настройках относительный размер (отношение макс. размера ванны расплава к размеру печатаемого сечения) и скорость (тип) кристаллизации ванны расплава будут различными, что приведёт к разному микрорельефу поверхности. Однако, выбирая одинаковые настройки печати для всех размеров пуансонов, как это было в нашем случае, была получена существенная разница в микрорельефе. Выполняя также сравнение микрорельефа в одной группе материалов, нержавеющей стали, (рис. 8г и 8д) можно убедиться в том, что качество поверхности отличается. Это объясняется целенаправленным изменением технологии 3D-печати на одном и том же оборудовании. Пуансоны из БФП (рис. 8е) и ПЭТГ (рис. 8ж) полученные по технологиям LCD и FFF, соответственно, имеют выраженный слоистый микрорельеф, обусловленный точностью печати 3D-принтера и высотой слоя.

3. Определение точности изготовления

После 3D-печати и пост-обработки прототипов выполнялся контроль размеров отдельных деталей, а также сборочных узлов (рис. 9). Для получения информации о раз-

мерах изделий применялся бесконтактный метод 3D-сканирования на основании структурированного подсвета. Перед проведение сканирования все объекты покрывались матирующим самоисчезающим спреем Ateco Ghost для получения равномерного коэффициента отражающей способности поверхности.

После получения серии сканов 3D-сканером RangeVision Neopoint, их обработки, финального совмещения и экспорта полигональной (stl-) модели фактического объекта в программе RV 3D Studio, полученный результат сравнивался с исходной CAD-геометрией в программе GOM Inspect. Точность финального совмещения для матрицы составила 0,036 мм, а для подборки нижней части инструмента составила 0,085 мм. Совмещение CAD-модели и фактической полигональной stl-модели выполнялось в два этапа. На первом этапе выравнивание осуществлялось либо по одной точке, либо по трём точкам соответствия, выбранных на каждой из 3D-моделей. На втором этапе выполнялось локальное наилучшее совпадение геометрии. Точность совмещения для матрицы на первом и втором этапах составила 0,0524 мм. Точность совмещения для подборки на первом этапе составила 0,61 мм, а на втором этапе составила 0,1618 мм.

Было установлено, что размеры по боковой внешней поверхности матричной вставки лежат вне симметричного допуска $\pm 0,1$ мм, соответствующего точности 3D-печати, напоминает дефект типа овальности (рис. 9а).

В центральной части (заходная часть матрицы и цилиндрическая стенка) красная область указывает на высокое несоответствие размеров что обусловлено отсутствием информации о геометрии по результатам 3D-сканирования. Подборка нижней части инструмента при установленном симметричном допуске ± 1 мм почти вся проходит по полю допуска. Однако, по гистограмме распределения размеров на карте отклонения геометрических размеров (КОГР), построенной для центрального сечения, видно, что разность размеров между исходной CAD-моделью и фактической полигональной stl-моделью лежит в интервале $\pm 0,2$, что в несколько раз превышает точность печати.

На основании полученных результатов метрологической оценки были определены неточности на этапах 3D-печати и сборки. Полученные значения отклонений указывают на то, что возможно применение напечатанных деталей инструмента без проведения доводочных операций сопрягающихся поверхностей, но для этого требуется учесть особенности самой технологии 3D-печати, микрорельеф поверхности, усадку и другое. В связи с этим наиболее рациональным будет являться подход, при котором размеры исходной 3D-модели изменяются с учётом итоговой механообработки.

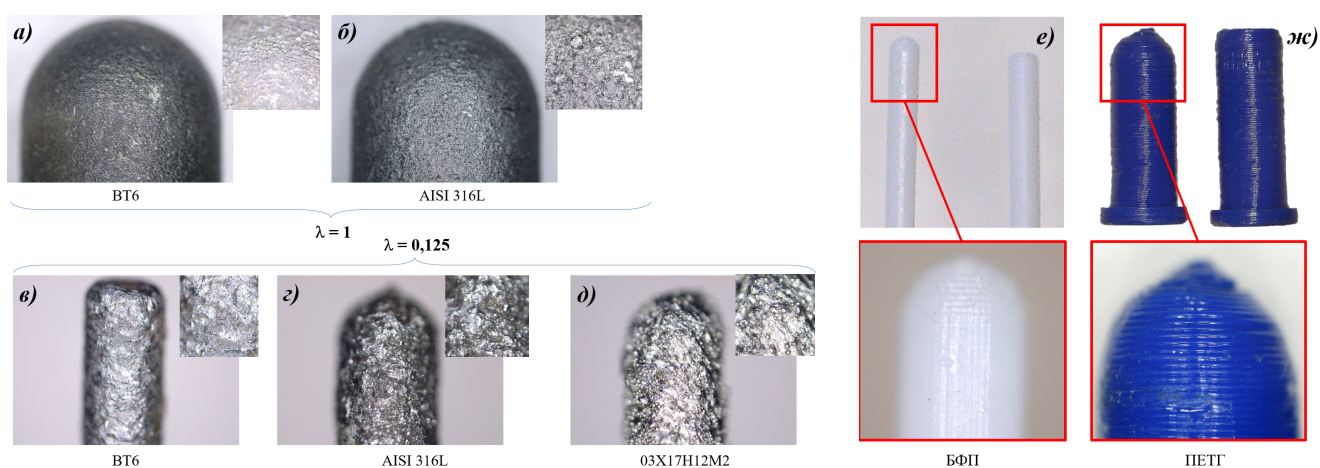


Рис. 8. Металлические (а–д) и полимерные (е–ж) пуансоны

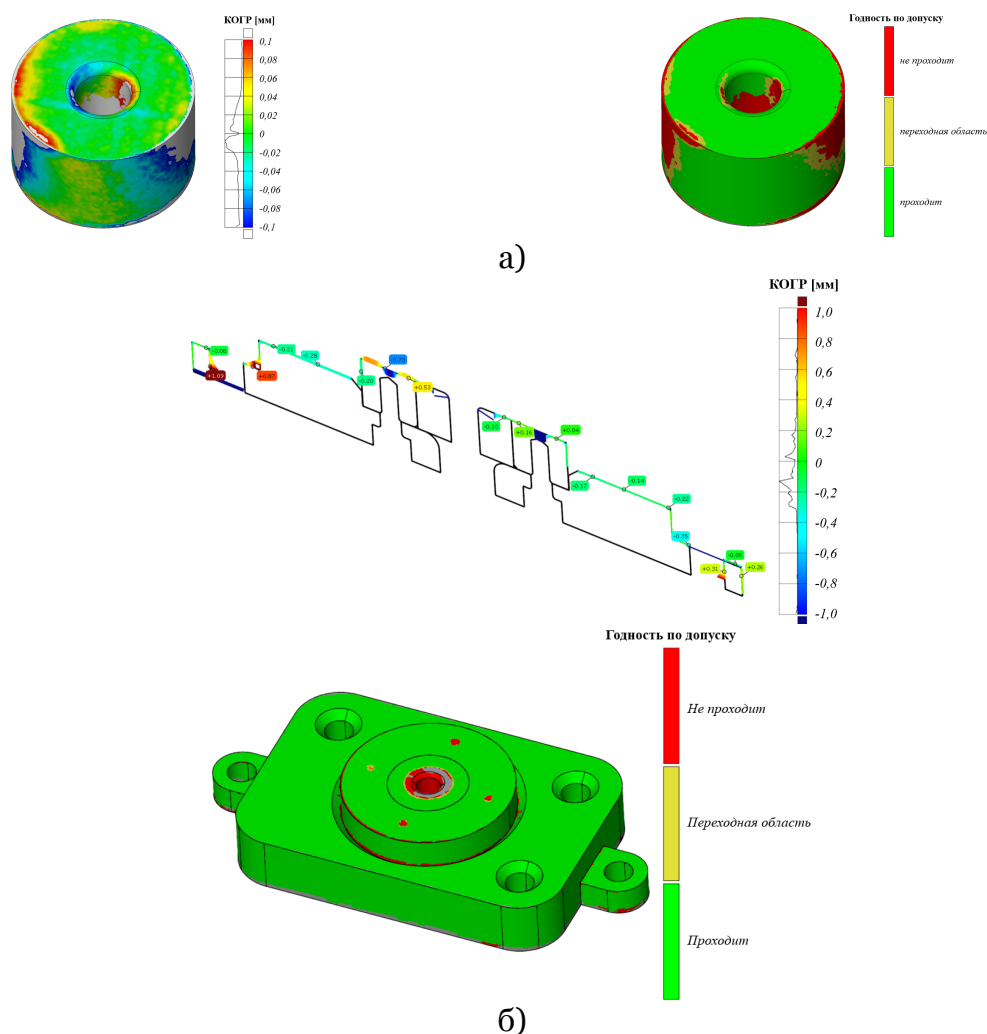


Рис. 9. Схема проведения исследования: матричная вставка (а) и подсборка нижней части инструмента (б)

4. Характеристика контактной поверхности

Послойное построение объектов оставляет характерную для метода 3D-печати топографию или микрорельеф (рис. 10). Для её описания требуются специальные инструменты, определяющие шероховатость поверхности (ГОСТ 2789-73, ГОСТ Р ИСО 4287-2014).

Так согласно ГОСТ Р 70117-2022 при плоском шлифовании, которое используется, как одна из итоговых операций при изготовлении деформирующих инструментов, шероховатость поверхности изменяется в диапазоне $Ra\ 6,3...0,05$ мкм. Шероховатость напечатанных прототипов изменяется в другом диапазоне. Это обстоятельство позволяет думать о том, что и технологические параметры процесса обработки давлением будут не соответствовать тем, которые приняты при разработке традиционных технологий, т.е. с применением инструментов, полученных механообработкой.

При определении шероховатости применялись измеритель шероховатости TR210 (Time Group Inc., Китай), на длине измерения 0,25 и 0,8 мм, и профилометр MarSurf M400 (Mahr GmbH, Германия), на длине измерения 2,5 мм. Шероховатость измерялась на поверхностях прототипов отдельных деталей-представителей инструмента из ВТ6, ПЭТГ, БФП и КПФП. По результатам измерений получены значения шероховатости, представленные в табл. 2. Определение износа поверхности осуществлялось на основании результатов экспериментов по схеме «стержень по пластине» на трибометре CSM TRB (рис. 11).

Табл. 2. Значение шероховатости поверхности прототипов

Материал	Ra		
	0,25	0,8	2,5
BT6	1,42	3,68	6,63
ПЭТГ	0,66	1,33	6,77
БФП	0,29	0,75	0,31
КПФП	1,10	1,27	0,64
Материал	Rz		
	7,56	20,26	22,18
BT6	7,56	20,26	22,18
ПЭТГ	3,06	6,43	22,73
БФП	1,44	4,55	1,63
КПФП	5,05	9,24	3,02

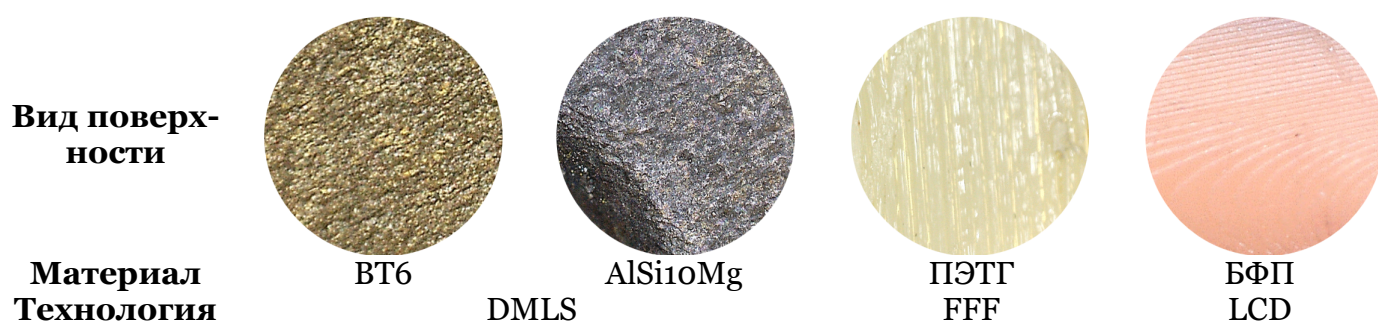


Рис. 10. Примеры микрорельефа (топографии) поверхностей деталей штампов

В процессе эксперимента субстрат (материал заготовки) получал трансляционное возвратно-поступательное перемещение для общей длины пути, равной $S=500$ м. При этом сверху на него устанавливался груз (1...5 Н). Изнашиваемая, контактная часть стержня (наконечник) имела полусферическую форму и была выполнена из материала инструмента.

После прохождения заданного пути материал субстрата и наконечник стержня снимались с испытательной машины. Определение коэффициента износа проводилось по формуле Арчарда, уравнение (2), для которого определялся объём износа материала наконечника стержня на основании известного диаметра формы наконечника и высоты сегмента после износа, уравнения (3) и (4), соответственно. Определение высоты сегмента можно проводить несколькими способами. Во-первых, после прямого измерения отпечатка износа при помощи микроскопа (цифрового, электронного), определяется высота сегмента по уравнению (4) (методика А). Во-вторых, возможно выполнение вычислений в CAD-программе, при помощи геометрических построений, на основании известного исходного радиуса полусферической части стержня и диаметра отпечатка (методика Б).

На рис. 12 показан износ полусферической части стержня под электронным (а) и цифровым (б) микроскопами.

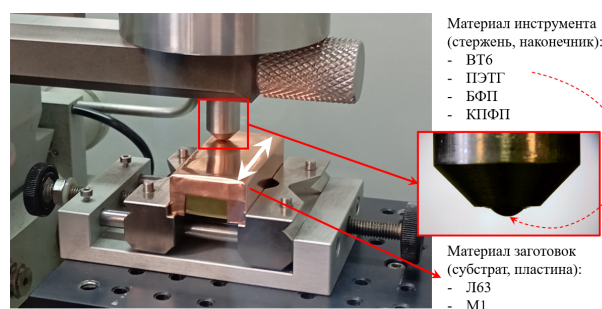


Рис. 11. Испытания на износ по схеме «стержень по пластине»

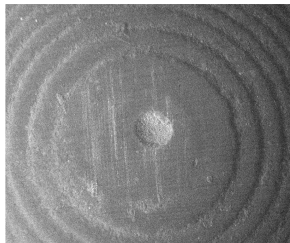
$$K = \frac{WH}{F_N S} \quad (2)$$

$$W = \frac{\pi h}{6} \left(\frac{3d_w^2}{4} - h^2 \right) \quad (3)$$

$$h = R - \sqrt{\left(R^2 - \frac{d_w^2}{4} \right)} \quad (4)$$

где W – объём износа, мм³; K – коэффициент износа; F_N – сила, создаваемая грузом, 1...5 Н; S – длина пути, мм; H – твёрдость более мягкого материала, Н/мм²; h – высота сегмента, мм; d_w – диаметр круглого отпечатка, мм; R – исходный радиус сферической части стержня, мм.

Отметим, что полусферический наконечник имеет две области износа. Таким образом, можно говорить об образовании дополнительной области износа, которая образуется из-за появившегося бурта на субстрате. В идеальном случае следует избегать образование бурта, появление которого связано с высокой нормальной силой (F_N), приложенной к стержню, что указывает либо на необходимость снижения веса груза, либо на уменьшение длины общей дистанции скольжения (S). Образование второй области также может быть связано с выкрашиванием КПФП в процессе проведения эксперимента.



а)



б)

Рис. 12. Визуальный контроль износа наконечника из КПФП под микроскопом: электронным (а) и цифровым (б)

5. Обсуждение результатов

Полученные методами 3D-печати деформирующие инструменты позволяют изготавливать миниатюрные детали в объёме мелкой серии (10...50 штук). При этом изменение в геометрии происходит на рабочих деталях инструмента, на пуансоне и матричной вставке, что требует их повторного изготовления.

Изучение микрорельефа позволило оценить шероховатость прототипов деталей деформирующего инструмента.

Применяя трибометр и микроскопы исследован износ материала инструмента для изготовления осесимметричной детали. Рассматривая испытания на износ в качестве источника информации о коэффициенте износа при линейном нагружении материала инструмента, полученного методом 3D-печати, возможно выполнить предварительную оценку износа криволинейной поверхности заходной части матрицы численным способом, например, при помощи конечно-элементного моделирования процесса микровытяжки.

Устранение неточностей изготовления может привести к минимизации преимуществ технологий аддитивного производства, по сравнению с традиционными технологиями, поэтому требуется заранее учитывать в геометрии цифровой модели допуски на механическую обработку.

6. Заключение

Аддитивные технологии являются перспективным способом изготовления разнообразного инструмента с высокой точностью и сложностью. Поставленные задачи по 3Д-печати из металлических и полимерных материалов инструментов для деформирования листовой заготовки могут быть выполнены, но нуждаются в обосновании оценки точности изготовления и эксплуатационной характеристики, влияющих на точность и качество детали, и настройку технологических параметров процесса деформирования, соответственно. Применяя известные методы оценки микрорельефа поверхности и износа для макроуровня необходимо также обосновать распространение этих результатов на микроуровень, что требует практического подтверждения на специализированном оборудовании, работающего на микрогабаритных образцах.

Список литературы

1. Hall, E. O. (1951). The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64(9), 747–753. DOI:10.1088/0370-1301/64/9/303
2. Petch, N.J. The cleavage strength of polycrystals. *J. Iron Steel Inst.* 1953, 174, 25–28
3. B. Meng, W.H. Wang, Y.Y. Zhang, M. Wan, Size effect on plastic anisotropy in microscale deformation of metal foil, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 271, 2019, Pages 46-61. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.03.023
4. Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N., & Engel, U. (2001). Microforming. *CIRP Annals*, 50(2), 445–462. DOI:10.1016/S0007-8506(07)62991-6
5. Fu, M. W., & Chan, W. L. (2014). Micro-scaled Products Development via Microforming. *Springer Series in Advanced Manufacturing*. DOI:10.1007/978-1-4471-6326-8
6. Jiang Z., Zhao J., Xie H. *Microforming Technology: Theory, Simulation, and Practice*, Academic Press, 2017. — 458 p. — ISBN: 978-0-12-811212-0.
7. Xu, J., Wang, X., Wang, C., Yuan, L., Chen, W., Bao, J., Guo, B. (2020). A Review on Micro/Nanoforming to Fabricate 3D Metallic Structures. *Advanced Materials*, 33(6), 2000893. DOI:10.1002/adma.202000893
8. Hansen, N. (2004). Hall–Petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia*, 51(8), 801–806. DOI:10.1016/j.scriptamat.2004.06.002
9. Smith W.F., Hashemi J. *Foundations of Materials Science and Engineering*, 7th Edition. — McGraw-Hill, 2023. — 1137 p. — ISBN 978-1260597709.
10. Wang, C., Guo, B., & Shan, D. (2014). Friction related size-effect in microforming – a review. *Manufacturing Review*, 1, 23. DOI:10.1051/mfreview/2014022
11. Kuhfuss, B. et al. (2020). Micro Forming Processes. In: Vollertsen, F., Friedrich, S., Kuhfuß, B., Maaß, P., Thomy, C., Zoch, HW. (eds) *Cold Micro Metal Forming. Lecture Notes in Production Engineering*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-11280-6
12. Shimizu, T., Yang, M., & Manabe, K. (2012). Impact of Surface Topography of Tools and Materials in Micro-Sheet Metal Forming. *Metal Forming - Process, Tools, Design*. DOI:10.5772/48296
13. Kuhfuss, B. et al. (2020). Micro Forming Processes. In: Vollertsen, F., Friedrich, S., Kuhfuß, B., Maaß, P., Thomy, C., Zoch, HW. (eds) *Cold Micro Metal Forming. Lecture Notes in Production Engineering*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-11280-6
14. Gieseke, M., Senz, V., Vehse, M., Fiedler, S., Irsig, R., Hustedt, M., ... Haferkamp, H. (2012). Additive Manufacturing of Drug Delivery Systems. *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 57(SI-1 Track-S). DOI:10.1515/bmt-2012-4109
15. Track F. (2014). *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 59(Supplement). DOI:10.1515/bmt-2014-5005

Research into the Application of Additive Technologies in the Development of Tools for Microdeformation of Sheet Blanks Made from Non-Ferrous Metals and Alloys

M.A. Petrov^{1,A}, D.H. Tran^{2,A}

Moscow Polytechnic University

¹ ORCID: 0000-0002-2324-5057, petrovma_mospolytech@mail.ru

² ORCID: 0009-0008-7152-6487, tranhung.bk56@gmail.com

Abstract

The paper shows the results of manufacturing of stamping tools for microforming operations. The tools and their main parts were obtained by different additive manufacturing technologies, from different materials (polymers and metals). A non-contact 3D scanning system was used to obtain metrological information on the accuracy of individual parts and assembly/subassembly. It was found that in order to match the dimensions of prototypes with the drawing dimensions and fall within the tolerance field, it is necessary to design the initial 3D model taking into account the peculiarities of 3D printing technology, mechanical processing, as well as the performance characteristics of the tool, which can be obtained from the results of wear tests.

Keywords: 3D-printing, FFF, SLM, LCD, microforming, copper M1, brass L63, aluminium alloys, surface wear.

References

1. Hall, E. O. (1951). The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64(9), 747–753. DOI:10.1088/0370-1301/64/9/303
2. Petch, N.J. The cleavage strength of polycrystals. *J. Iron Steel Inst.* 1953, 174, 25–28
3. B. Meng, W.H. Wang, Y.Y. Zhang, M. Wan, Size effect on plastic anisotropy in microscale deformation of metal foil, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 271, 2019, Pages 46-61. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.03.023
4. Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N., & Engel, U. (2001). Microforming. *CIRP Annals*, 50(2), 445–462. DOI:10.1016/S0007-8506(07)62991-6
5. Fu, M. W., & Chan, W. L. (2014). *Micro-scaled Products Development via Microforming*. Springer Series in Advanced Manufacturing. DOI:10.1007/978-1-4471-6326-8
6. Jiang Z., Zhao J., Xie H. *Microforming Technology: Theory, Simulation, and Practice*, Academic Press, 2017. — 458 p. — ISBN: 978-0-12-811212-0.
7. Xu, J., Wang, X., Wang, C., Yuan, L., Chen, W., Bao, J., Guo, B. (2020). A Review on Micro/Nanoforming to Fabricate 3D Metallic Structures. *Advanced Materials*, 33(6), 2000893. DOI:10.1002/adma.202000893
8. Hansen, N. (2004). Hall–Petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia*, 51(8), 801–806. DOI:10.1016/j.scriptamat.2004.06.002
9. Smith W.F., Hashemi J. *Foundations of Materials Science and Engineering*, 7th Edition. — McGraw-Hill, 2023. — 1137 p. — ISBN 978-1260597709.
10. Wang, C., Guo, B., & Shan, D. (2014). Friction related size-effect in microforming – a review. *Manufacturing Review*, 1, 23. DOI:10.1051/mfreview/2014022

11. Kuhfuss, B. et al. (2020). Micro Forming Processes. In: Vollertsen, F., Friedrich, S., Kuhfuß, B., Maaß, P., Thomy, C., Zoch, HW. (eds) Cold Micro Metal Forming. Lecture Notes in Production Engineering. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-11280-6
12. Shimizu, T., Yang, M., & Manabe, K. (2012). Impact of Surface Topography of Tools and Materials in Micro-Sheet Metal Forming. Metal Forming - Process, Tools, Design. DOI:10.5772/48296
13. Kuhfuss, B. et al. (2020). Micro Forming Processes. In: Vollertsen, F., Friedrich, S., Kuhfuß, B., Maaß, P., Thomy, C., Zoch, HW. (eds) Cold Micro Metal Forming. Lecture Notes in Production Engineering. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-11280-6
14. Gieseke, M., Senz, V., Vehse, M., Fiedler, S., Irsig, R., Hustedt, M., ... Haferkamp, H. (2012). Additive Manufacturing of Drug Delivery Systems. Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik, 57(SI-1 Track-S). DOI:10.1515/bmt-2012-4109
15. Track F. (2014). Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik, 59(Supplement). DOI:10.1515/bmt-2014-5005