

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-91-105

**Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А., Анциферов С.И.,
Герасимов М.Д., Мелентьев Н.А.*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

**E-mail: nslubim@bk.ru*

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МЕТАЛЛ-МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ В СРАВНЕНИИ С АДДИТИВНОЙ И СУБТРАКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Аннотация. Развитие аддитивного производства приводит к появлению новых технологий 3D печати, новым материалам для 3D печати и постепенному удешевлению производства. На сегодняшний день стоимость используемого для 3D печати металлом оборудования, а также материалы – металлические порошки, всё ещё остаются очень дорогими. Этот фактор делает не доступными эти технологии производства для гражданской машиностроительной промышленности при изготовлении функциональных деталей. Стоимость аддитивного производства металлических деталей в основном зависит от объёма печати, следовательно, снижение объёма печати, может привести к существенному снижению стоимости изготовления детали. Изготовление металлической оболочки, полость которой заполняется дешёвым металлополимером, может быть отличной альтернативой полностью металлической детали. Такая металл-металлополимерная композитная деталь может обладать достаточной прочностью, при этом существенно более низкой стоимостью. Однако для понимания экономической эффективности использования той или иной технологии производства, на сегодняшний день отсутствуют какие-либо зависимости. В статье приводится методика расчёта стоимости изготовления детали рычаг по различным технологиям: субтрактивным, аддитивным, технология изготовления композитной детали. По расчётным данным была построена зависимость стоимости изготовления детали от штучного времени которое можно интерпретировать как объём механической обработки. Построенная линейная зависимость может дать представление об эффективности применения той или иной технологии получения детали. Кроме того, описаны не экономические факторы влияющие на возможность применения различных технологических процессов изготовления детали. В совокупности представленные данные позволяют технологу комплексно оценить возможность эффективного применения той или иной технологии производства и принять соответствующее обоснованное решение.

Ключевые слова: металлополимер, механическая обработка, эффективность, штучное время, машиностроение, аддитивные технологии, композит, себестоимость.

Введение. В работах сотрудников Московского автомобильно-дорожного института [1, 2], применение полимерно-композиционных материалов (ПКМ) ставится в зависимость от применяемого наполнителя в полимерной матрице (ПМ), сравнительные данные приведены в таблице 1.

С точки зрения применения ПКМ в области машиностроения, то их чаще всего используют при изготовлении кузовных деталей, элементов отделки кабины и др. [1, 2]. Использование ПКМ с дисперсным наполнителем для изготовления деталей, испытывающих значительные нагрузки, практически не представлено в литературе. Это связано с тем, что вопросы применения ПКМ с дисперсными наполнителями малоизучены, отсутствует методика оценки эффективности применения ПКМ при изготовлении функциональных деталей машин. Кроме того, отсутствует технология и технологическое обеспечение для изготовления деталей машин из реактопластов. В

основном [4–6] представлены и описаны технологии литья терморезистивных полимеров. Данная технология аналогична литью термопластичных полимеров. Суть этой технологии заключается в подаче из бункера гранул полимерной композиции в цилиндр, где под действием шнека или плунжера полимер подаётся в зону нагрева, где под действием токов высокой частоты происходит расплав полимера. Далее расплав впрыскивается в металлическую пресс-форму.

Применение таких дисперсно-наполненных ПКМ как металлополимеры, в промышленности часто ограничено ремонтными работами [7–9]. Однако металлополимеры, это реактопласты, обладающие для своего класса материалов уникальными свойствами. Среди уникальных свойств металлополимеров можно отметить прочность на сжатие до 230 МПа, прочность на растяжение до 60 МПа, Прочность на изгиб до 80 МПа, Модуль Юнга 6000 МПа [10]. Указанные свойства присущи отвержденному компаунду, но

до отверждения, металлополимерная смесь обладает высокими свойствами текучести, вязкость смеси достигает 25000 мПа·с. Некоторые свойства металлополимерных материалов приведены в таблице 2.

Согласно [3] объёмы производства изделий из ПКМ ежегодно увеличиваются (рис. 1).

Таблица 1

Сравнение ПКМ с различными типами наполнителей

Характеристики	ПКМ	
	Дисперсно-упрочненные	Армированные волокнистыми наполнителями
Роль матрицы	Несет основную нагрузку	Передает нагрузку на волокно
Роль наполнителя	Упрочняет матрицу. Степень упрочнения зависит от формы частиц наполнителя, их количества и распределения	Волокно несет основную нагрузку при растяжении
Степень наполнения, масс. ч.	1...200	65...75
Коэффициент упрочнения (представляет собой отношение предела текучести ПМ к пределу текучести полимерной матрицы)	1,1...15	2...50
Прочность ПМ	Зависит от прочности полимерной матрицы и мало зависит от количества наполнителя	Зависит от прочности волокон, схемы армирования и изменяется пропорционально объемному содержанию волокон
Свойства ПМ	Изотропные	Анизотропные
Области применения при ремонте машин	Устранение различных типов дефектов (раковин, трещин, коррозионных повреждений и пр.) в корпусных и кузовных деталях и агрегатах машин	Системы диагностирования. Устранение различных типов дефектов (раковин, трещин, коррозионных повреждений и пр.) в корпусных и кузовных деталях и агрегатах машин

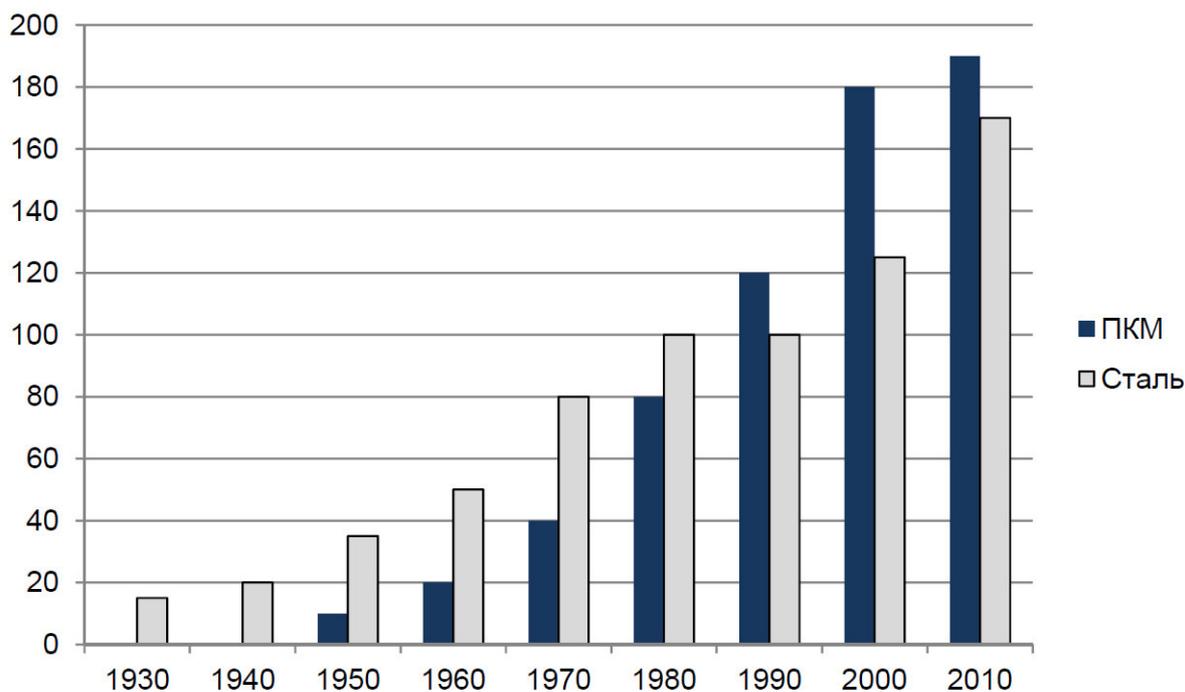


Рис. 1. Объемы производства изделий из стали и ПКМ по годам, млн. м³

Свойства металлополимерных материалов

Коммерческое название	Прочность на сжатие (DIN 53281-83), МПа	Прочность на растяжение (DIN 53281-83), МПа	Прочность на изгиб (DIN 53281-83), МПа	Вязкость смеси, МПа·с	Модуль Юнга, МПа
WEICON WR жидкий, наполненный сталью	110	33	80	20 000	5500
Devcon Plastic Steel Liquid (B)	70	–	–	25000	–
Металлополимер LEO «Ферро-хром»	230	–	76	–	6000
Loctite Hysol 3479	90	60	–	–	6000

Хотя изначально, производители металлополимеров указывают в своих рекомендациях по применению металлополимеров в качестве назначения ремонт и восстановление различных поверхностей технологического оборудования, изобретатели часто используют металлополимеры в качестве конструкционного материала для производства технологической оснастки [11–12]. В работах [13, 14] инженеры используют металлополимер для изготовления формообразующих поверхностей пресс-форм, так как металлополимер обладает достаточной прочностью и температуростойкостью, что обеспечивает необходимую стойкость оснастки. В дальнейшем, такая композитная оснастка, состоящая из металлической обоймы и металлополимерной формооб-

разующей части, используется для литья термопластов на термопластавтоматах или шприц-прессах.

На сегодняшний день проводятся научно-исследовательские работы [15, 16], по изучению возможности и созданию технологии и технологического обеспечения для изготовления композитных функциональных деталей. Суть изготовления композитной детали на основе металлополимера заключается в изготовлении тонкостенной оболочки при помощи аддитивных технологий с последующим заполнением такой оболочки металлополимерным ПКМ. На рис. 2 показана модель такой композитной детали, состоящей из металлополимерного заполнителя 1 и оболочки 2.

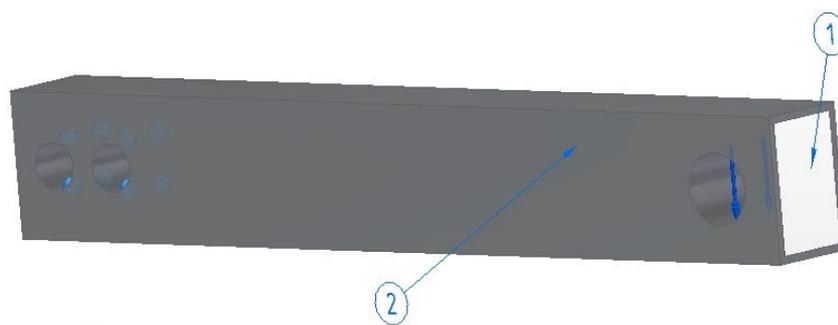


Рис. 2. Модель композитной детали: 1 – металлополимерный заполнитель; 2 – пустотелая оболочка

В работе [15, 16] приводятся исследования прочностных характеристик таких конструкций деталей. На рис. 3 показана диаграмма отражающая запас прочности деталей, изготовленных из чистых материалов, так если бы они были изготовлены полностью из металла или пластика на 3D принтере и композитных деталей, состоящих из металлической или пластиковой оболочки заполненной металлополимером.

Анализ диаграммы (рис. 3) показывает, что наиболее прочной остаётся деталь, изготовленная из металла. Композитная деталь, состоящая из металлической оболочки и металлополимерного заполнителя, так же обладает достаточной прочностью с запасом прочности в 3,75. Таким образом для заданных условий эксплуатации, как было описано в [16] (нагрузка на изгиб 2000 Н для рычага экзоскелета), использование композитной конструкции детали вполне приемлемо.

При этом если говорить об аддитивных технологиях изготовления, то стоимость изготовления рычага зависела бы только от объёма материала печати. Стоимость изготовления подобной де-

тали классическими технологиями с использованием механической обработки закладывало бы в себя стоимость материала, стоимость фонда оплаты труда, стоимость технологического обеспечения и др. расходы.

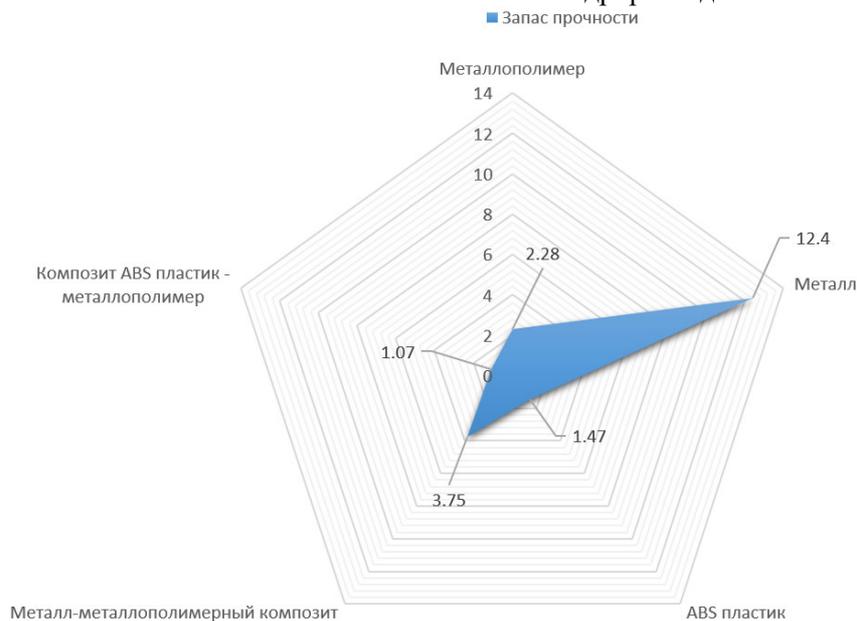


Рис. 3. Диаграмма запаса прочности композитных и цельных деталей

В данном исследовании приводятся расчёты на основе анализа стоимости изготовления рычага экзоскелета (по сути это может быть любая схожая по габаритам деталь) по технологии со снятием припуска в сопоставлении с технологией изготовления композитной детали на основе металлополимера. Анализируются и приводятся факторы влияющие на себестоимость изготовления детали по различным технологиям. Приводятся критерии эффективности применения технологии изготовления композитной детали.

Материалы и методы. Согласно теории машиностроения [17, 18], одним из основных параметров, влияющих на себестоимость изготовления изделия, является основное технологическое время изготовления изделия. Для понимания входящих в технологический процесс операций, приведём схемы технологических процессов для различных технологических процессов изготовления детали – рычага (рис. 4).

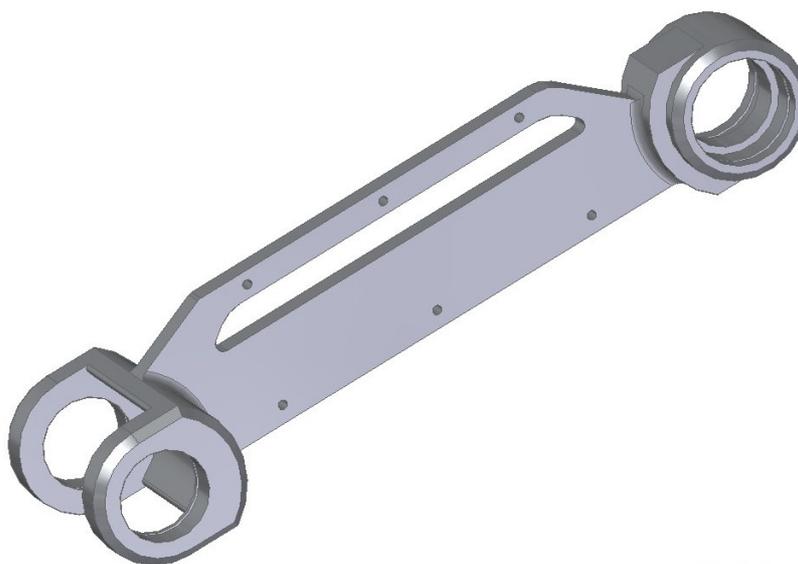


Рис. 4. Модель рычага.

На рис.4 представлена схема технологического процесса изготовления рычага путем снятия припуска с металлической заготовки.

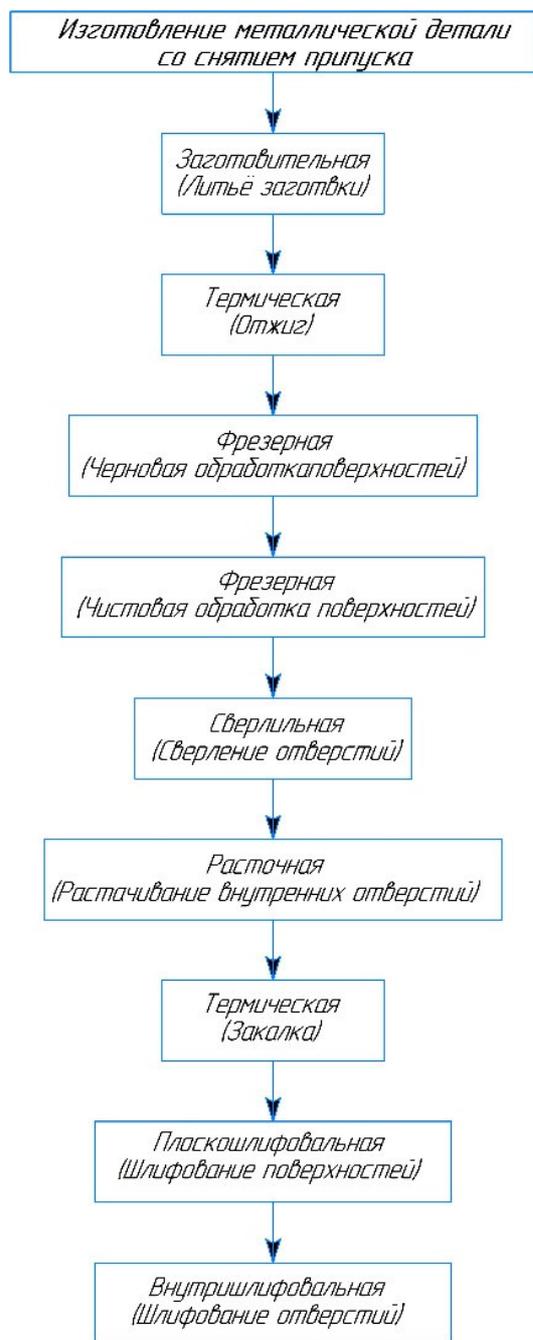


Рис. 5. Схема технологического процесса изготовления рычага из металла со снятием припуска

На рис. 6 показана схема технологического процесса получения детали рычаг с применением аддитивных технологий. В частности с использованием технологии SLM (Selective Laser Melting) [19–21].

На рис. 7 показана схема технологического процесса изготовления композитного рычага путем заполнения тонкостенной металлической оболочки изготовленной методом 3D печати металлом и заполненной металлополимером.

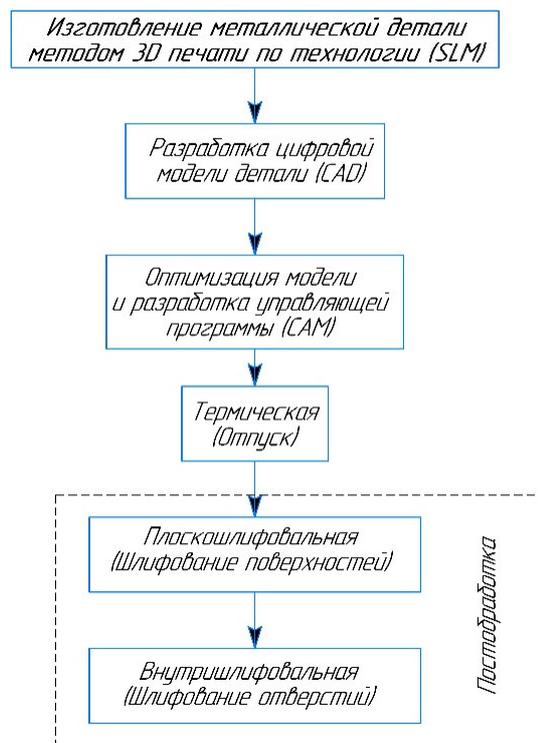


Рис. 6. Схема технологического процесса изготовления рычага из металла методом 3D печати (SLM)

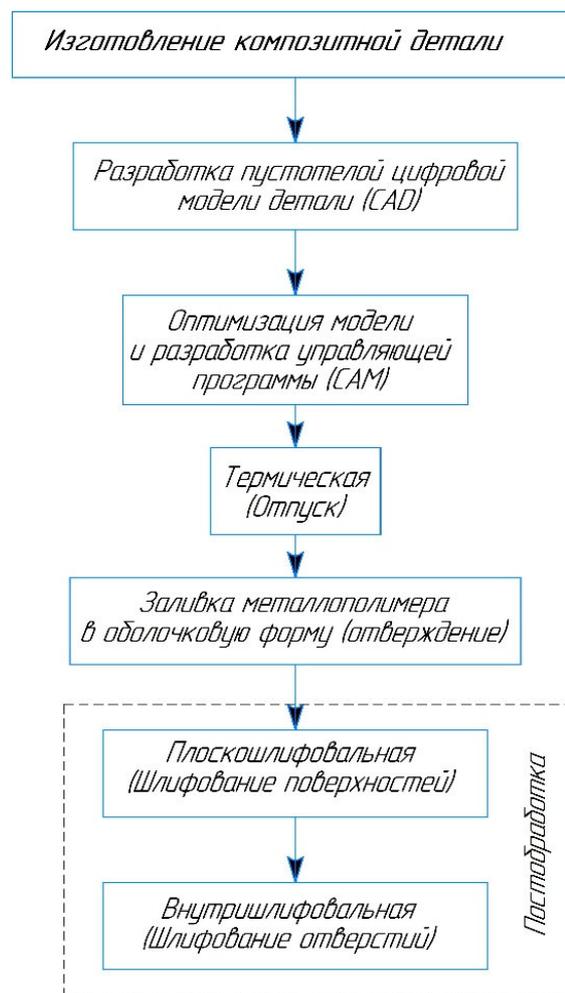


Рис. 7. Схема технологического процесса изготовления композитного рычага

Технико-экономическое сравнение технологических процессов произведем по технологической себестоимости изготовления детали:

$$C_T = M + Z + НР, \text{руб.} \quad (1)$$

где M – затраты на основные материалы без стоимости отходов с транспортно-заготовительными расходами;

Z – основная и дополнительная зарплата производственных рабочих с начислениями;

$НР$ – накладные расходы, состоящие из цеховых расходов, общезаводских, управленческих и внепроизводственных расходов.

Затраты на основные материалы для технологического процесса включающего механическую обработку резанием включают следующие показатели:

$$C_{MO} = \frac{C_p}{1000} \cdot M_z, \text{руб.} \quad (2)$$

где M_z – масса заготовки поковки для детали представленной на рис. 4 равняется 5,873 кг, а детали 5,339 кг;

C_p – стоимость 1 т металла марки 40Х13 ГОСТ 5632-72, на 15.01.2022 $C_p = 165000$ руб.

Стоимость отходов вычисляется по выражению:

$$C_{отх} = \frac{S_{отх}}{1000} \cdot (M_z - M_d), \text{руб.} \quad (3)$$

где, $S_{отх}$ – стоимость 1 т отходов [22], $S_{отх} = 3100$ руб.

Транспортно-заготовительные расходы принимаем по данным [22] в размере 2,2 % от стоимости заготовки.

Размер фонда оплаты труда (зарботная плата) производственных рабочих на соответствующую технологическую операцию рассчитывается по выражению:

$$Z = Z_o + Z_{доп} + Z_{нач}, \text{руб.} \quad (4)$$

где, Z_o – основная заработная плата с учетом 40 % премии при сдельно-премиальной системе оплаты, руб.

$$Z_o = 1,4 \frac{C_q \cdot T_{шк}}{60}, \text{руб.} \quad (5)$$

где, C_q – часовая тарифная ставка соответствующего разряда работы, руб;

$T_{шк}$ – штучно-калькуляционное время для данной операции, мин. ($T_{шк} = T_{ш} + T_{пз}/N$);

$T_{пз}$ – подготовительно-заключительное время на партию N обрабатываемых заготовок;

$Z_{доп}$ – дополнительная зарплата основных рабочих, т.е. оплата отпусков и т.д. ($Z_o \cdot 0,3$), руб.;

$Z_{нач} = 0,399(Z_o + Z_{доп})$, руб – начисление на зарплату по социальному страхованию – по данным ООО «Машиностроительный завод» 39,9 % от ($Z_o + Z_{доп}$).

Накладные расходы:

$$НР = ЦР + ОР + УР + ВР, \text{руб.} \quad (6)$$

где, $ЦР$ – цеховые расходы, принимаемые по данным ООО «Машиностроительный завод» в размере 224% от Z_o ;

$ОР$ – общезаводские расходы, принимаем в размере 162% от Z_o ;

$УР$ – управленческие расходы, принимаем в размере 50% от Z_o ;

$ВР$ – внепроизводственные расходы, принимаем равными 25% от ($M + Z_o + Z_{доп} + Z_{нач} + ЦР + ОР + УР$).

Основная часть. Произведём расчёты полной себестоимости изготовления детали «рычаг» (рис. 4) по трём технологическим процессам представленным на (рис. 5–7).

В таблице 3 приведены результаты расчетов заработной платы основных производственных рабочих для технологического процесса изготовления рычага из металлической заготовки путём снятия припуска (рис. 5). Расчетные данные приводятся из условия подготовительно-заключительного времени равного 32 минутам (по данным ООО «Машиностроительный завод»), а также размера партии изделий $N = 200$ шт.

Вариант изготовления детали по схеме технологического процесса изготовления рычага из металла со снятием припуска (рис. 5), предполагает получение заготовки методом литья или штамповки. Для расчета стоимости заготовки S используется выражение [22]:

$$S = \left(\frac{C_i}{1000} \cdot Q \cdot K_T \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_M \cdot K_N \right) - (Q - q) \cdot S_{отх}, \text{руб.} \quad (7)$$

где C_i – базовая стоимость одной тонны заготовок, руб./т;

Q – масса заготовки, кг;

q – масса детали, кг;

K_T – коэффициент, зависящий от класса точности;

K_C – коэффициент, зависящий от степени сложности;

K_B – коэффициент, зависящий от массы заготовки;

K_M – коэффициент, зависящий от марки материала;

K_N – коэффициент, зависящий от объёма выпуска заготовок.

Базовая стоимость одной тонны заготовок C_i принимается по данным предприятия потребителя заготовок, а коэффициенты входящие в уравнение (7) по таблицам [23]. Стоимость заготовки для детали «рычаг», по данным ООО «Машиностроительный завод» составляет $S = 754$ руб.

Таким образом полная стоимость металлической детали «рычаг», изготовленной по схеме технологического процесса со снятием припуска

составляет $C_T = 20157.4$ руб. Безусловно, расчётное значение отражает стоимость изготовления детали так, если бы всё предприятие, его персонал и оборудование было ориентировано на изготовление только одной детали «рычаг». На практике и основные фонды и персонал, задействованы в других производственных процессах, что снижает стоимость изделия. По данным ООО «Машиностроительный завод», полная стоимость C изделия рычаг составляет $C = C_T \cdot 0.2 = 4031.48$ руб.

Таблица 3

Заработная плата основных производственных рабочих для технологического процесса (рис. 5)

№ опер.	Наименование операции	Станок	Разряд	$C_ч$	$T_{ш}$	$T_{шк}$	Z_o	$Z_{доп}$	$Z_{нач}$	
005	Фрезерная предварительная	Lupus 5X 100	5	256	32	32.2	192.1	57.6	99.6	
010	Фрезерная чистовая	Lupus 5X 100	5	256	27	27.2	162.2	48.7	84.2	
015	Сверлильная	ГФ2171С3	5	176	23	23.2	95.1	28.5	49.3	
020	Расточная	BO 90 CNC	5	256	41	41.2	245.9	73.8	127.5	
025	Термическая	Печь ТВЧ	5	156	300	300.2	1092.6	327.8	566.7	
030	Плоскошлифовальная	HFS 40100 F Advance	4	256	47	47.2	281.7	84.5	146.1	
035	Внутришлифовальная	RSM 500 B CNC	5	256	53	53.2	317.5	95.3	164.7	
Итого:						523.0	524.1	2387.1	716.1	1238.2

Расчёт стоимости изготовления детали «рычаг» (рис. 4) методом 3D печати металлом. Согласно схеме технологического процесса представленной на рис. 6. Начинается с конструкторской подготовки, то есть с разработки 3D модели и её оптимизации для дальнейшего создания управляющей программы. В данном исследовании, с учётом сложности модели, затратами на конструкторскую подготовку можно пренебречь.

Термическая операция для снятия напряжений детали, после её спекания на 3D принтере, входит в стоимость аддитивного изготовления. В таблице 4 представлены данные о стоимости 3D печати металлом. Специфика аддитивного производства [19, 24], соотносит стоимость изготовления детали с её объёмом. То есть на стоимость изготовления влияет только объём печати.

Таблица 4

Данные о стоимости 3D печати детали из нержавеющей стали

Источник	Стоимость 1 см ³ , руб.
https://sprint3d.ru	967.79
https://www.cubicprints.ru	860.18
https://studia3d.com	1099.24
https://mg3d.ru	967.79
https://3d-made.com	1021.60
Средняя стоимость	983.17

На рис. 8 представлены массово-центровочные характеристики модели МЦХ детали «рычаг». Согласно данным рис. 8 объём детали равен 680 см³. Исходя из стоимости 3D печати (табл. 3) и объёма модели, не сложно посчитать, что стоимость изготовления детали «рычаг», будет составлять 668553 руб. Очевидно, что изготовление

детали «рычаг», экономически не обосновано с использованием технологий аддитивной печати металлом. Для снижения стоимости 3D печати, производят оптимизацию стоимости формы изделия применяя генеративный дизайн [25]. Генеративный дизайн позволяет убрать часть материала из модели формы, который не задействуется

в работе изделия и передаче нагрузок. Тем не менее даже оптимизация формы изделия путём генеративного дизайна не позволяет существенно снизить объём материала, что сказывается и на цене изготавливаемой детали. Обычно, 3D печать используется для изготовления деталей

сложной формы, когда изготовление детали другими методами, не представляется возможным или существуют строгие временные ограничения. 3D печать позволяет изготовить деталь без организации сложной подготовки производства и разработки технологического обеспечения, что сокращает время изготовления.



Рис. 8. Массово-центровочные характеристики детали «рычаг»

Изготовление композитной детали в соответствии с схемой технологического процесса представленного на рис.7, предполагает аддитивное изготовление пустотелой оболочки и заполнение её металлополимером.

Металлическая оболочка изготавливается путём её печати на 3D принтере и служит не только для придания формы изделию, но и несет функциональное назначение. Так как не смотря на заполнение тела изделия металлополимером для придания ему прочностных свойств, необходимо обеспечить требуемые свойства рабочих поверхностей, например, поверхностей под посадку подшипников, плоскостей примыкания детали к другим сборочным единицам и т.д. Другими словами необходимо обеспечить требуемые размерные и качественные (шероховатость поверхности) свойства детали. Прочностные свойства рабочих поверхностей при этом будут задаваться материалом 3D печати.

Стоимость 1 см³ металлополимера наполненного нержавеющей сталью [26], по данным производителя составляет 6.61 руб.

На рис. 9 показан разрез тонкостенной модели рычага и её МЦХ. Тонкостенная модель рычага, с толщиной стенки 1 мм, имеет объём равный 140 см³, что на 540 см³ меньше чем у полнотелой детали. В стоимостном выражении аддитивного производства, это на 530911 руб. меньше аддитивное производства полнотелой детали. Стоимость аддитивного изготовления оболочки из металла равняется 137620 руб.

При этом как для полностью напечатанной детали на 3D принтере из металла, так и для композитной детали, требуется финишная обработка рабочих поверхностей, для придания им требуемых качественных и размерных характеристик. В целом из-за достигаемого 3D печатью качества поверхности [27], соответствующего допуску размерной точности 20-150 мкм и шероховатости поверхности Ra 3.8-15 мкм, требуется постобработка. При изготовлении композитной детали рис. 7 постобработка включает операции плоского и внутреннего шлифования.

Стоимость механической обработки для композитной детали (операции шлифования), будут включать только стоимость фонда заработной платы и накладных расходов, а также понижающего коэффициента 0.2. Стоимость шлифовальной обработки детали «рычаг» будет равняться 950 руб.

Полная стоимость изготовления композитной детали «рычаг» будет состоять из стоимости изготовления оболочки равной 137620 руб., стоимости шлифовальной обработки 950 руб., кроме

того в стоимость изготовления входит стоимость операции заливки металлополимера. Стоимость операции заливки металлополимером тонкостенной оболочки включает стоимость фонда заработной платы на операцию, равного 46 руб. А также стоимость металлополимерной композиции. Для детали рычаг потребуется 540 см^3 металлополимера, по стоимости 6.61 руб/см^3 , то есть на всю деталь 3569.4 руб.

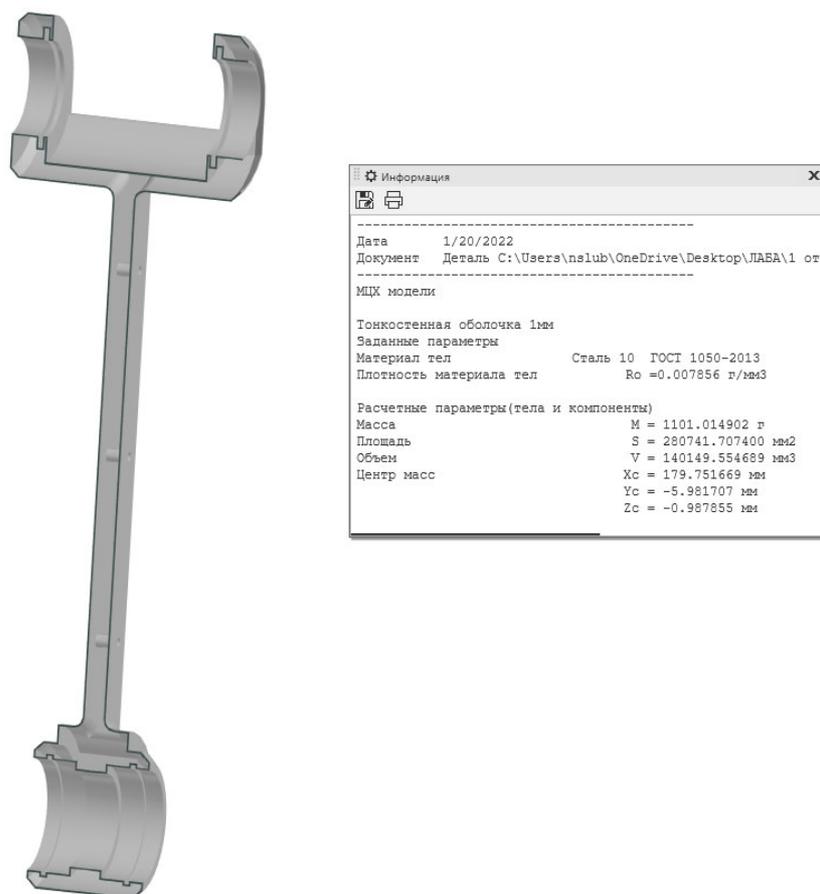


Рис. 9. Массово-центровочные характеристики пустотелой детали «рычаг» с толщиной стенки 1 мм

Выводы. В исследовании представлены расчёты стоимости изготовления детали «рычаг» по 3 технологическим процессам. Расчёты показывают, что изготовление детали путём механической обработки металлической заготовки по стоимости соответствует 20157.4 руб. за 1 единицу изделия. При этом стоимость изготовления существенно зависит от размера партии, а также объёма механической обработки.

Усреднив значения размера стоимости оплаты труда по различным операциям и поставив стоимость механической обработки в зависимости от штучного времени, можно рассчитать зависимость технологической себестоимости детали C_T , от штучного времени изготовления детали.

Технологическая себестоимость изделия, полностью напечатанного на 3D принтере из металла, будет зависеть от объёма печати. Кроме того, для выбора технологии аддитивного производства при изготовлении детали, немаловажным будет фактор технологического времени на процесс 3D печати. По данным [28] время изготовления детали «рычаг» на 3D принтере в зависимости от объёма печати составило бы 1440 мин., а изготовление пустотелой оболочки 296 мин.

Время изготовления и технологическая себестоимость изготовления композитной детали, с учётом постобработки, составляют 402 мин и 142186 руб.

На рис. 10 показаны области эффективного использования различных технологий получения

детали по критерию технологической себестоимости.

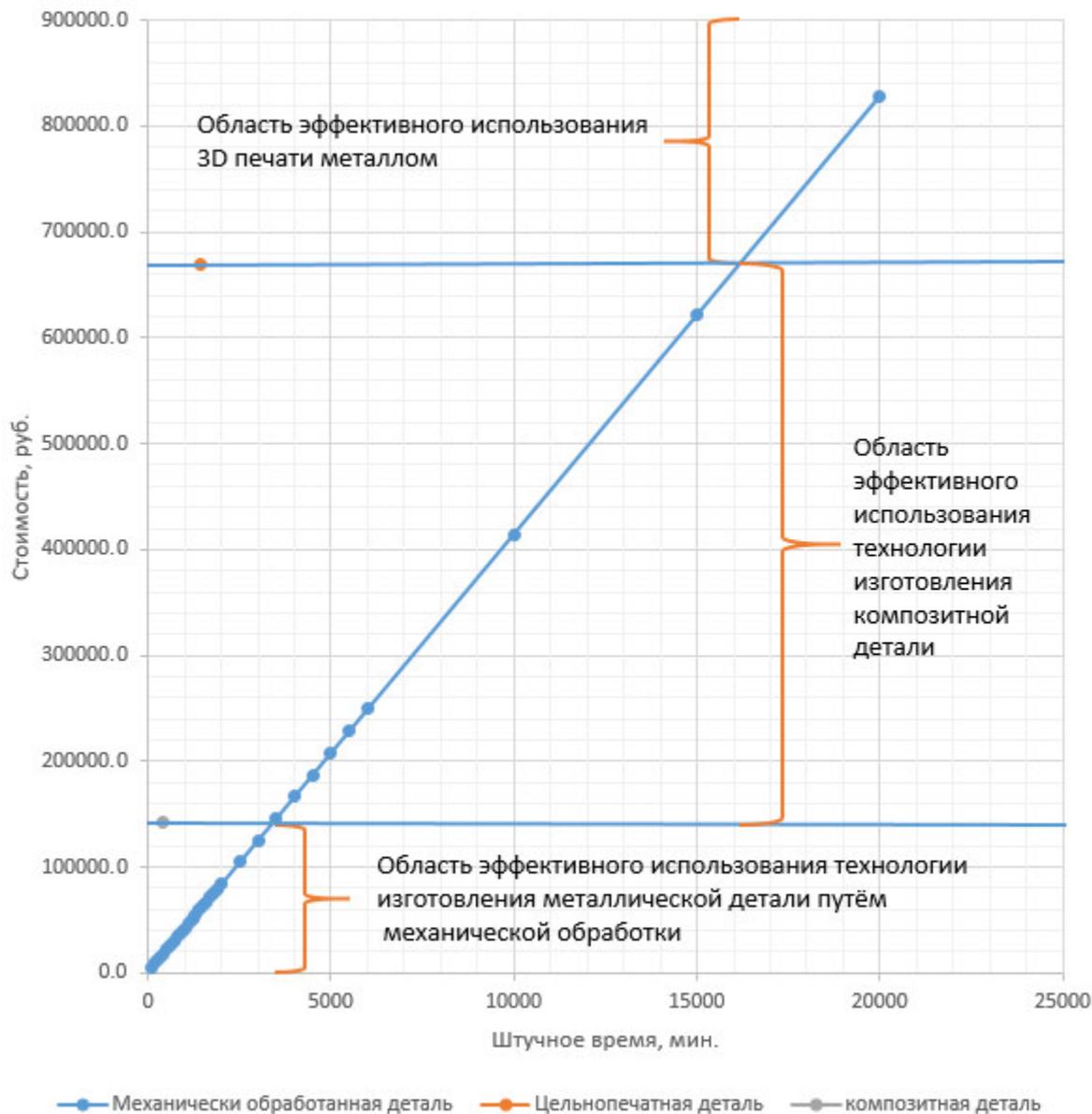


Рис. 10. Сопоставление стоимости изготовления детали по различным технологиям: технология механической обработки, печать цельной детали на 3D принтере, изготовление композитной детали.

Для принятия решения об использовании той или иной технологии изготовления детали, инженеру технологу необходимо учитывать не только технологическую себестоимость (рис. 10), но и другие параметры. К таким параметрам относятся следующие параметры:

- прочность детали, которая будет различной для каждой детали, изготовленной по той или иной технологии. В зависимости от служебного назначения, необходимо производить прочностные расчёты (например, с использованием метода конечных элементов МКЭ), для определения запаса прочности детали, изготовленной по различным технологиям;

- имеющееся технологическое обеспечение и оборудование. К такому оборудованию относится доступ к парку станочного оборудования, имеющаяся технологическая оснастка и инструмент;

- размер партии и серийность производства. Серийность производства оказывает сильное влияние на стоимость подготовки производства, стоимость технологического обеспечения, а также технологических приспособлений;

- допустимое время производства. Если говорить о производстве новых деталей, то влияние времени производства выражается в большей степени на фонде заработной платы. Но что делать, когда время производства детали влияет на

работоспособность машины или комплекса машин, как в случае ремонтного производства. В случае, когда необходимо произвести деталь для ремонта технологического оборудования, иногда стоимость производства детали имеет второстепенную роль, нежели скорость производства, так как простой оборудования может нанести куда более существенный негативный экономический эффект, нежели потери от увеличения стоимости изготовления детали необходимой для ремонта этого оборудования;

- сложность геометрической формы детали. Служебное назначение детали, требования к её массе, форме, эргономике так же оказывают существенное влияние на выбор технологии производства. Например, применение аддитивных технологий, часто используют в случаях, когда форма детали имеет сложную структуру и геометрию. Наличие криволинейных полостей, внутренних каналов, тонких стенок и пр. Кроме того акцент к применению аддитивных технологий смещается, если происходит восстановление детали по цифровой модели, полученной 3D сканированием, то есть когда отсутствует чертёж детали.

Полученные данные и приведенная расчётная методика позволяет в комплексе с учётом других параметров, принять решение об эффективности использования той или иной технологии получения детали.

Приведенные расчётные данные не отражают расчёта получения композитной детали, где в качестве материала оболочки использовался бы пластик, а заполнение её производилось бы металлополимерным составом. Такая композитная деталь пластик – металлополимер, была бы очень дешёвой, так как стоимость 3D печати пластиком не высока, как и материал заполнения – металлополимер. Однако эта технология ограничена в сферах применения в первую очередь прочностными свойствами как самой детали, так и рабочих поверхностей. Кроме того, связь реологических свойств металлополимера при заполнении тонкостенной формы и её геометрии так же накладывает ряд ограничений на изготовление такой композитной детали и требует дополнительных научно-экспериментальных изысканий в области технологического обеспечения.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт научного проекта № МЛ-6/21 от 22.11.21 г. по теме: «Повышение эффективности процесса получения деталей строительных машин из композитных материалов, за счёт применения топологической оптимизации формы».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учебное пособие. М.: МАДИ. 2016. 264 с.
2. Баурова Н.И. Диагностирование и ремонт машин с применением полимерных материалов: монография. М.: ТехПолиграфЦентр, 2008. 280 с.
3. Андреева А.В. Основы физикохимии и технологии композитов: учеб. пособие. М.: ИПРЖР, 2001. 192 с.
4. Берлин А.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. 3-е испр. изд. СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. 560 с.
5. Зорин В.А., Баурова Н.И. Ремонт теплонагруженных элементов машин и оборудования с использованием наполненных полимерных материалов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 4. С. 16–18.
6. Любимый Н.С., Чепчуров М.С., Тетерина И.С. Обработка комбинированной металл-металлополимерной плоской поверхности детали пресс-формы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 6. С. 119–123.
7. Bytsenko O.A., Bessonova N.A., Dzhafarov E.E., Tishkov V.V., Gnevashev D.A. Production of technological plugs for engine box and oil system using additive technologies // INCAS Bull. 2021. Vol. 13. Pp. 21–27. doi:10.13111/2066-8201.2021.13.S.3.
8. Palka D. Use of Reverse Engineering and Additive Printing in the Reconstruction of Gears // Multidiscip. Asp. Prod. Eng. 2020. Vol. 3. P. 48–57. doi:10.2478/mape-2020-0024.
9. Зорин В.А., Баурова Н.И. Повышение стойкости полимерных материалов, применяемых при ремонте машин, к воздействию циклических нагрузок // Механизация строительства. 2013. № 4 (826). С. 25–27.
10. Металлополимеры «ЛЕО». М.: Изд-во «ЗАО Металлополимерные материалы ЛЕО», 2013. 33 с.
11. Зленко М.А., Забеднов П.В. Аддитивные технологии в опытно-литейном производстве. Литье металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм // Металлургия машиностроения. 2013. №3. С. 12–18.
12. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Российские нанотехнологии. 2013. № 3. С. 24–42.
13. Менгес Г., Микаэли В., Морен П. Как делать литьевые формы. СПб.: Профессия, 2007. 614 с.

14. Liang J., Narahara H., Koresawa H., Suzuki H. Verification and evaluation of automatically designed cooling channels for block-laminated molds // UK: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. Pp. 1751–1761.
15. Lubimyi N., Annenko D.M., Chepchurov M.S., Kostoev Z.M. The research of the temperature effect on a metal polymer during flat grinding of a combined metal polymer part // Australian Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 80. Pp. 1–13. doi:10.1080/14484846.2020.1786654
16. Lubimyi N.S., Polshin A.A., Gerasimov M.D., Tikhonov A.A., Antsiferov S.I., Chetverikov B.S., Ryazantsev V.G., Brazhnik J., Ridvanov I. Justification of the Use of Composite Metal-Metal-Polymer Parts for Functional Structures // Polymers 2022. 14. 352. doi:10.3390/polym14020352
17. Дальский А.М. Технология машиностроения: учеб. для вузов: в 2 т. Т.1: Основы технологии машиностроения. 2-е изд., стер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. 562 с.
18. Дальский А.М., Суслов А.Г., Назаров Ю.Ф. Энциклопедия. Технология изготовления деталей машин Т. III-3. М. Машиностроение, 2000. 839 с.
19. Buchanan C., Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges // Eng. Struct. 2019. Vol. 180. Pp. 332–348. doi:10.1016/j.engstruct.2018.11.045
20. Tian C., Li X., Li H., Guo G., Wang L., Rong Y. The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM) // Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 743. Pp. 697–706. doi:10.1016/j.msea.2018.11.138.
21. Wang H.-Y., Lo Y.-L., Tran H.-C., Raza M.M., Le T.-N. Systematic approach for reducing micro-crack formation in Inconel 713LC components fabricated by laser powder bed fusion. // Rapid Prototyp. J. 2021. Vol. 27. Pp. 1548–1561. doi:10.1108/RPJ-11-2020-0282.
22. Шодиев З. О., Хамроев Х.Х., Шодиев А.З., Хамроев Б.Х. Расчет стоимости получения заготовки различными методами // Молодой ученый. 2017. № 12 (146). С. 96-97.
23. Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г. Справочник технолога машиностроителя: в 2-х т. М.: Машиностроение, 2001. Т.1. 914 с.
24. Ryabikina M.A. 3D metal printing: a brief SWOT analysis. // Report. Priazovskyi State Tech. Univ. Sect. Tech. Sci. 2019. Vol. 38. Pp. 45–52
25. Khan S., Gunpinar E., Moriguchi M., Suzuki H. Evolving a psycho-physical distance metric for generative design exploration of diverse shapes // Journal of Mechanical Design. 2019. Vol. 141. Pp. 1–16. doi:10.1115/1.4043678
26. Металлополимерные материалы «ЛЕО» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.leopolimer.ru/Price.htm> (дата обращения: 23.01.2022)
27. Проектирование под 3D-печать металлом, DMLM и DMLS [Электронный ресурс]. URL: <https://top3dshop.ru/blog/proektirovanie-pod-3d-pechat-metallom-dmlm-i-dmls.html> (дата обращения: 23.01.2022)
28. Haleem A., Javaid M. 3D printed medical parts with different materials using additive manufacturing // Clin. Epidemiol. Glob. Heal. 2020. Vol. 8. Pp. 215–223. doi:10.1016/j.cegh.2019.08.002.

Информация об авторах

Любимый Николай Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nslubim@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Польшин Андрей Александрович, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: info@polshin.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Тихонов Александр Андреевич, магистрант. E-mail: cherep2240@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Герасимов Михаил Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: mail_mihail@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Мелентьев Никита Андреевич, студент кафедры подъёмно-транспортных и дорожных машин. E-mail: sancesnik1@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Поступила 30.01.2022 г.

© Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А., Анциферов С.И., Герасимов М.Д., Мелентьев Н.А., 2022

**Lubimiy N.S., Polshin A.A., Tikhonov A. A., Antsiferov S.I., Gerasimov M.D.,
Melentiev N.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: nslubim@bk.ru*

EVALUATION OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF THE TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COMPOSITE METAL-METAL-POLYMER PARTS IN COMPARISON WITH ADDITIVE AND SUBTRACTIVE TECHNOLOGIES

Abstract. *The development of additive manufacturing leads to the emergence of new 3D printing technologies, new materials for 3D printing and a gradual reduction in the cost of production. Nowadays, the cost of equipment used for metal and metal powders 3D printing are still very expensive. This factor makes the production technologies unavailable for the civil engineering industry in the manufacture of functional parts. The cost of additive manufacturing of metal parts is mainly dependent on the volume of printing. Reducing the print volume can lead to a significant reduction in the cost of manufacturing the part. Fabrication of a metal shell, the cavity of which is filled with a cheap metal polymer, can be an excellent alternative to an all-metal part. Such a metal-metal-polymer composite part can have sufficient strength and significantly lower cost. However, there are no dependencies today to understand the economic efficiency of using a particular production technology. The article provides a method for calculating the cost of manufacturing a lever part using various technologies: subtractive, additive and composite part manufacturing technology. According to the calculated data, the dependence of the cost of manufacturing a part on piece time is built. It can be interpreted as the amount of machining. The constructed linear dependence can give an idea of the effectiveness of the application of a particular technology for obtaining a part. In addition, non-economic factors affecting the possibility of using various technological processes for manufacturing a part are described. Together, the presented data allow the technologist to comprehensively assess the possibility of effective application of a particular production technology and make an appropriate informed decision.*

Keywords: *metal polymer, mechanical processing, efficiency, piece time, mechanical engineering, additive technologies, composite, prime cost*

REFERENCES

1. Baurova N.I., Zorin V.A. The use of polymeric materials in the manufacture and repair of machines [Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov pri proizvodstve i remonte mashin]. M.: MARI, 2016. 264 p. (rus)
2. Baurova N.I. Diagnostics and repair of machines using polymeric materials [Diagnostirovanie i remont mashin s primeneniem polimernykh materialov]. M.: TechPolygraphCenter, 2008. 280 p. (rus)
3. Andreeva A.V. Fundamentals of physical chemistry and technology of composites [Osnovy fizikohimii i tekhnologii kompozitov]. M.: IPRGR, 2001. 192 p. (rus)
4. Berlin A.A. Polymer composite materials: structure, properties, technology: textbook [Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: ucheb. posobie]. St. Petersburg: TsOP "Professiya". 2011. 560 p.
5. Zorin V.A., Baurova N.I. Repair of heat-loaded elements of machines and equipment using food polymer materials [Remont teplonagruzhenykh elementov mashin i oborudovaniya s ispol'zovaniem napolnennykh polimernykh materialov]. Repair, restoration, modernization. 2013. No. 4. Pp. 16–18. (rus)
6. Lubimiy N.S., Chepchurov M.S., Teterina I.S. Processing of a combined metal-metal-polymer flat surface of a mold part [Obrabotka kombinirovannoy metall-metallopolimernoy ploskoj poverhnosti detali press-formy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 6. Pp. 119–123.
7. Bytsenko O.A.; Bessonova N.A., Dzhafarov E.E., Tishkov V.V., Gnevashev D.A., Production of technological plugs for engine box and oil system using additive technologies. INCAS Bull. 2021. Vol. 13. Pp. 21–27. doi:10.13111/2066-8201.2021.13.S.3.
8. Palka D. Use of Reverse Engineering and Additive Printing in the Reconstruction of Gears. Multidiscip. Asp. Prod. Eng. 2020. Vol. 3. Pp. 48-57. doi:10.2478/mape-2020-0024.
9. Zorin V.A., Baurova N.I. Improving the resistance of polymeric materials used in the repair of machines to the effects of cyclic loads [Povyshenie

- stojkosti polimernykh materialov, primenyaeyh pri remonte mashin, k vozdeystviyu ciklicheskih nagruzok]. Mechanization of construction. 2013. No. 4 (826). Pp. 25–27.
10. Metal polymers "LEO". M.: Publishing house "ZAO Metal-polymer materials LEO". 2013. 33 p.
11. Zlenko M.A., Zabednov P.V. Additive technologies in pilot foundry. Casting of metals and plastics using synthesis models and synthesis forms [Additivnye tekhnologii v opytном litejnom proizvodstve. Lit'e metallov i plastmass s ispol'zovaniem sintez-modelej i sintez-form]. Metallurgy of mechanical engineering. 2013. No.3. Pp. 12–18.
12. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Yu. Prospects for the use of carbon-containing nanoparticles in binders for polymer composite materials [Perspektivy ispol'zovaniya uglerodsoderzhashchih nanochastich v svyazuyushchih dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov]. Russian nanotechnologies. 2013. No. 3. Pp. 24–42.
13. Menges G., Michaeli V., Moren P. How to make injection molds [Kak delat' lit'evye formy] St. Petersburg: Profession, 2007. 614 p.
14. Liang J., Narahara H., Koresawa H., Suzuki H. Verification and evaluation of automatically designed cooling channels for block-laminated molds. UK: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. Pp. 1751–1761.
15. Lubimyi N., Annenko D.M., Chepchurov M.S., Kostoev Z.M. The research of the temperature effect on a metal polymer during flat grinding of a combined metal polymer part. Australian Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 80. P. 1–13. doi:10.1080/14484846.2020.1786654
16. Lubimyi N.S., Polshin A.A., Gerasimov M.D., Tikhonov A.A., Antsiferov S.I., Chetverikov B.S., Ryazantsev V.G., Brazhnik J., Ridvanov I. Justification of the Use of Composite Metal-Metal-Polymer Parts for Functional Structures. Polymers 2022. Vol. 14. Iss. 352. Pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym14020352>
17. Dalsky A. M. et al. Engineering technology: textbook. for universities: in 2 volumes. V.1: Fundamentals of mechanical engineering technology [Tekhnologiya mashinostroeniya: ucheb. dlya vuzov: v 2 t. T.1: Osnovy tekhnologii mashinostroeniya]. 2nd ed., ster. M.: Publishing house of MSTU named N. E. Bauman, 2001. 562 p.
18. Dalsky A.M., Suslov A.M., Nazarov Yu.F. et al. Encyclopedia. Manufacturing technology of machine parts T. III-3 [Enciklopediya. Tekhnologiya izgotovleniya detalej mashin]. M. Mashinostroenie, 2000. 839 p.
19. Buchanan C., Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. Eng. Struct. 2019. Vol. 180. Pp. 332–348. doi:10.1016/j.engstruct.2018.11.045
20. Tian C., Li X., Li H., Guo G., Wang L., Rong Y. The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM). Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 743. Pp. 697–706. doi:10.1016/j.msea.2018.11.138.
21. Wang H.-Y., Lo Y.-L., Tran H.-C., Raza M.M., Le T.-N. Systematic approach for reducing micro-crack formation in Inconel 713LC components fabricated by laser powder bed fusion. Rapid Prototyp. J. 2021. Vol. 27. Pp. 1548–1561. doi:10.1108/RPJ-11-2020-0282.
22. Shodiev Z.O., Khamroev Kh.Kh., Shodiev A.Z., Khamroev B.Kh. Calculation of the cost of obtaining a workpiece by various methods [Raschet stoimosti polucheniya zagotovki razlichnymi metodami]. Young scientist. 2017. No. 12 (146). Pp. 96–97.
23. Dalsky A.M., Kosilova R.K., Meshcheryakov R.K., Suslov A.G. Handbook of a machine builder technologist: in 2 volumes [Spravochnik tekhnologa mashinostroytelya]. M.: Mashinostroenie. 2001. Vol.1. 914 p.
24. Ryabikina M.A. 3D metal printing: a brief SWOT analysis. Report. Priazovskyi State Tech. Univ. Sect. Tech. Sci. 2019. Vol. 38. Pp. 45–52.
25. Khan S., Gunpinar E., Moriguchi M., Suzuki H. Evolving a psycho-physical distance metric for generative design exploration of diverse shapes. Journal of Mechanical Design. 2019. Vol. 141. Pp. 1–16. DOI:10.1115/1.4043678
26. Metal-polymer materials "LEO". URL: <http://www.leopolimer.ru/Price.htm> (date of treatment: 23.01.2022)
27. Design for 3D printing with metal, DMLM and DMLS [Proektirovanie pod 3D-pechat' metallom, DMLM i DMLS] URL: <https://top3dshop.ru/blog/proektirovanie-pod-3d-pechat-metallom-dmlm-i-dmls.html> (date of treatment: 23.01.2022)
28. Haleem A., Javid M. 3D printed medical parts with different materials using additive manufacturing. Clin. Epidemiol. Glob. Heal. 2020. Vol. 8. Pp. 215–223. doi:10.1016/j.cegh.2019.08.002.

Information about the authors

Lubimyi, Nikolai S. Ph.D. in engineering, Associate Professor. E-mail: nslubim@bk.ru Belgorod State Technological University. Named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, 46.

Polshin, Andrey A. Postgraduate student. E-mail: info@polshin.ru. Belgorod state technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Tikhonov, Aleksandr A. Master's student. E-mail: cherep2240@rambler.ru Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Antsiferov, Sergey I. PhD, Associate Professor. E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Gerasimov, Mikhail D. PhD, Associate Professor. E-mail: mail_mihail@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, 46.

Melentiev, Nikita A. Student. E-mail: sancesnik1@gmail.com. Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Received 30.01.2022

Для цитирования:

Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А., Анциферов С.И., Герасимов М.Д., Мелентьев Н.А. Оценка экономической эффективности технологии изготовления композитных металл-металлополимерных деталей в сравнении с аддитивной и субтрактивной технологиями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 91–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-91-105

For citation:

Lubimyi N.S., Polshin A.A., Tikhonov A. A., Antsiferov S.I., Gerasimov M.D., Melentiev N.A. Evaluation of the economic efficiency of the technology for manufacturing composite metal-metal-polymer parts in comparison with additive and subtractive technologies. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 91–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-91-105