

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАПАСНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Н.К. Толочко,

профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. ф.-м. наук, профессор

В.М. Синельников,

декан факультета предпринимательства и управления БГАТУ, канд. экон. наук, доцент

О.В. Сокол,

ст. преподаватель каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ

П.С. Чугаев,

ст. преподаватель каф. технологии металлов БГАТУ

Т.А. Богданович,

студент факультета технического сервиса БГАТУ

Рассмотрена методология оценки целесообразности аддитивного производства запасных деталей при внеплановых ремонтах машин.

Ключевые слова: ремонт машин, запасные детали, аддитивные технологии.

The methodology for assessing the feasibility of additive production of spare parts for unscheduled repairs of machines is considered.

Keywords: repair of machines, spare parts, additive technologies.

Введение

С каждым годом растет число различных предприятий, проявляющих заинтересованность в применении аддитивных технологий (АМ-технологий – от англ. Additive Manufacturing). Главным фактором, сдерживающим их применение, является отсутствие у руководителей предприятий достаточных знаний о данных технологиях, что затрудняет оценку достоинств, недостатков и выбор наиболее приемлемых из них [1]. Сложность оценки и выбора этих технологий обусловлена их многообразием. Существует более десятка базовых АМ-технологий, различающихся расходными материалами (металлы, полимеры, керамика и др.) и процессами послойного построения изделий. Кроме того, существует большое количество разного по своим функциональным характеристикам АМ-оборудования.

В последнее время с целью содействия распространению АМ-технологий, консалтинговые компании, специализирующиеся в сфере инновационного менеджмента, начали консультировать предприятия по вопросам применения этих технологий. С другой стороны, фирмы, производящие АМ-оборудование, начали открывать собственные консалтинговые подразделения [1]. Это привело к развитию различных методологий, направленных на более активное при-

влечение предприятий к применению АМ-технологий. Так, известны методологии оценки экономических перспектив применения АМ-технологий [2], анализа организационных, технических, сбытовых и других факторов, стимулирующих применение АМ-технологий [3], подбора изделий, подходящих для изготовления с применением АМ-технологий [4], определения стоимости изготовления АМ-изделий [5]. Все они в обобщенном виде представлены в методологии оценки целесообразности применения АМ-технологий [1]. Ее основу составляет следующий алгоритм информационно-аналитических мероприятий:

- 1) ознакомление с АМ-технологиями;
- 2) определение возможностей изготовления изделий с применением АМ-технологий, в том числе в сочетании с традиционными технологиями;
- 3) анализ экономических последствий применения АМ-технологий.

При этом для повышения эффективности принимаемых решений о применении АМ-технологий предлагается использовать компьютерную систему поддержки принятия решений, позволяющую работать с базами данных, рассматривать различные сценарии развития производства с учетом соотношения производственных возможностей и требований к из-

готовляемым изделиям, обосновывать принятие решений с помощью оптимизационных методов.

Следует отметить, что эта методология адресована в первую очередь тем предприятиям, которые планируют приобретать АМ-оборудование и, соответственно, создавать собственные производства, основанные на применении АМ-технологий. Вместе с тем имеется большое число предприятий, у которых нет необходимости в приобретении АМ-оборудования, поскольку у них в силу специфики производственной деятельности возникают лишь сравнительно редкие потребности в изготовлении единичных АМ-изделий. К ним относятся сельскохозяйственные, транспортные, мелиоративные, лесозаготовительные, дорожно-строительные и другие предприятия, имеющие в своем распоряжении сравнительно большой парк различных машин, для внепланового ремонта которых приходится приобретать запасные детали, в том числе путем их изготовления на стороне с применением АМ-технологий. При этом руководители таких предприятий должны иметь аргументированные основания для принятия соответствующих решений.

В данной статье кратко рассмотрены методологические аспекты оценки целесообразности применения АМ-технологий для изготовления запасных деталей машин при внеплановых ремонтах.

Актуальность рассматриваемых вопросов обусловлена необходимостью совершенствования методов оценки и использования АМ-технологий для обеспечения машин запчастями при их ремонте. На сегодняшний день затраты на приобретение запчастей составляют 50-70 % от стоимости ремонта [6]. При этом большинство последствий отказов машин устраняются благодаря использованию запчастей (например, у сельскохозяйственной техники они доходят до 70 %) [7]. Особенно актуально применение АМ-технологий в тех случаях, когда требуется провести ремонт техники, которая снята с серийного производства, а также в случаях, когда ожидание требуемых для ремонта запчастей приведет к длительному простоев техники, что в свою очередь вызовет значительные производственные потери.

Основная часть

Внеплановые ремонты машин вызываются их отказами в работе, которые в большинстве случаев связаны с внезапным выходом из строя деталей по непредвиденным причинам. Такими причинами могут быть: нарушение правил эксплуатации машин, несвоевременное или некачественное техническое обслуживание и ремонт машин, заводской брак, стихийные бедствия и другие [8, 9].

Если вышедшие из строя детали не подлежат восстановлению, то их заменяют запасными деталями. Обычно потребности в запчастях определяются забла-

говременно с помощью различных расчетных методик. Однако эти методики не позволяют достаточно точно предусмотреть все потребности в запчастях [10, 11]. Это связано с тем, что спрос на запчасти имеет неравномерную структуру, он может изменяться во времени в зависимости от сезонности, климатических условий, экономической ситуации на рынке и т.д. [10].

Несовершенство методик определения потребностей в запчастях, необоснованное снижение уровня их запасов на складе или несвоевременное пополнение ими склада могут привести к ситуациям, когда детали в процессе эксплуатации внезапно выходят из строя, а требуемые для их замены запасные детали отсутствуют на складе. В таких ситуациях предприятие, которому необходимо осуществить внеплановый ремонт, должно предпринимать меры по приобретению отсутствующих запасных деталей. Обычно предприятие их покупает, но если их покупка оказывается невозможной (например, из-за прекращения производства), то детали приходится изготавливать. Если предприятие не в состоянии изготовить их собственными силами, то оно вынуждено изготавливать их на стороне по специальным заказам. При этом предприятию важно выбрать такие технологии изготовления и такие предприятия-изготовители, чтобы можно было обеспечить требуемое качество деталей при минимальных затратах, связанных с ремонтом. В тех случаях, когда требуемые детали могут быть изготовлены с применением АМ-технологий, необходимо, прежде чем принимать соответствующее решение, оценить целесообразность применения этих технологий, для чего следует руководствоваться соответствующей методологией.

В основу такой методологии может быть положен следующий алгоритм информационно-аналитических мероприятий:

- определение принципиальных возможностей изготовления запасных деталей с применением АМ-технологий;
- определение возможных видов АМ-технологий, позволяющих изготовить запасные детали требуемого качества, в том числе в сочетании с традиционными технологиями;
- определение возможных предприятий-изготовителей запасных деталей;
- определение возможных способов доставки изготовленных запасных деталей;
- определение затрат, связанных с внеплановым ремонтом машин, для разных вариантов изготовления запасных деталей (для разных видов применяемых АМ- и/или традиционных технологий, а также для разных предприятий-изготовителей и способов доставки деталей).

Согласно этой методологии, для конкретных случаев внепланового ремонта, решения о целесообразности применения АМ-технологий для изготовления за-

пасных деталей по одному из возможных вариантов принимаются по результатам определения затрат, связанных с ремонтом, а именно: выбирается тот вариант изготовления, для которого затраты предприятия, осуществляющего ремонт, оказываются наименьшими.

Рассмотрим особенности выполнения перечисленных выше мероприятий.

1. Прежде чем анализировать возможные варианты изготовления запасных деталей с применением АМ-технологий, необходимо определить, подходят ли они для такого изготовления с учетом, с одной стороны, материалов, размеров и формы деталей, а с другой – возможностей АМ-технологий. Дело в том, что АМ-технологии позволяют создавать детали из ограниченного числа материалов. Кроме того, АМ-оборудование имеет ограниченные размеры рабочей зоны, которыми определяются максимально возможные размеры изготавливаемых деталей. Вместе с тем, с помощью АМ-технологий можно создавать детали весьма сложных форм, какие трудно обеспечить используя традиционные технологии. В этом состоит одно из главных преимуществ АМ-технологий, которое следует принимать во внимание при принятии решений об изготовлении деталей с применением этих технологий.

2. Для АМ-технологий существуют определенные пределы в достижении точности размеров и шероховатости поверхности деталей, которые задаются толщиной слоев материала, формируемых в процессе их изготовления. В силу послойного характера построения, детали приобретают поверхностный рельеф типа «ступенчатой лестницы». Для повышения точности размеров и снижения шероховатости поверхности АМ-детали дополнительно подвергают механической обработке (в частности, фрезерованию).

Существует два подхода к изготовлению деталей с применением АМ-технологий: прямое изготовление, когда готовые детали получают непосредственно с помощью АМ-технологий, и не прямое изготовление, когда с помощью АМ-технологий получают формообразующую оснастку, которая затем используется для получения деталей традиционными технологиями (литьем, штамповкой и др.). Выбор того, или иного подхода зависит от достигаемого качества изготавливаемых запасных деталей, а также затрат, связанных с внеплановым ремонтом.

При рассмотрении АМ-технологий следует иметь в виду, что в некоторых случаях они позволяют создавать детали, превосходящие по качеству аналогичные детали, получаемые по традиционным технологиям. Это достигается, например, формированием в АМ-деталях градиентных структур, либо внесением изменений в их конструкцию, в частности, путем создания внутренних полостей (каналов) для охлаждения или облегченных сетчатых конструкций, что не всегда

можно обеспечить за счет традиционных технологий [11]. Однако необходимо заметить, что такого рода усовершенствования деталей требуют проведения соответствующих испытаний, что не предусматривается в рамках решения задач срочного изготовления запасных частей для внеплановых ремонтов машин.

3. При определении возможных предприятий-изготовителей запасных деталей следует учитывать, с одной стороны, виды АМ-технологий, которые будут применяться для изготовления деталей, в том числе в сочетании с традиционными технологиями, а с другой – производственную базу предприятий. При этом не исключена возможность изготовления деталей на двух и более предприятиях. Например, на одном предприятии с помощью АМ-технологий будет создаваться литейная оснастка, после чего на другом предприятии с помощью этой оснастки будут создаваться литые детали [11]. При такой форме организации производственного процесса полученная оснастка в определенных случаях может использоваться по мере необходимости для многократного изготовления деталей. Кроме того, следует учитывать месторасположение предприятий-изготовителей, которое может влиять на условия доставки готовых деталей на предприятие, осуществляющее внеплановый ремонт.

4. Основные характеристики процесса доставки изготовленных запасных деталей – стоимость и длительность доставки. Они зависят, как указывалось выше, от взаимного расположения предприятий-изготовителей и предприятия, осуществляющего ремонт машин (т.е. от их взаимной удаленности), а также от способов (средств) доставки деталей.

Особого учета требует длительность доставки деталей, которая, наряду с длительностью их изготовления, в значительной мере определяет длительность простоя машин в связи с ремонтом. Нередко потери основного производства от простоев машин оказываются в несколько раз выше стоимости самих запчастей, из-за отсутствия которых возникли простои [11, 13, 14].

5. Ранее, в ряде работ [15-18], рассматривались отдельные вопросы определения затрат, связанных с внеплановым ремонтом машин. С учетом этих работ, а также в соответствии с методологией, предложенной выше, затраты, связанные с внеплановым ремонтом, заключающимся в замене неисправной детали на запасную деталь, изготовленную на стороннем предприятии, можно определить в общем случае по формуле:

$$Z_p = Z_{вр} + П_{п}, \quad (1)$$

где $Z_{вр}$ – затраты на выполнение ремонта, руб.;

$П_{п}$ – потери из-за простоя в результате ремонта [15], ч.

$$Z_{BR} = Z_{PP} + Z_{DD} + C_D, \quad (2)$$

где Z_{PP} – затраты на проведение ремонтных работ по замене детали, руб.;

Z_{DD} – затраты по доставке запасной детали с предприятия-изготовителя на предприятие, осуществляющее ремонт, руб.;

C_D – покупная стоимость запасной детали [15], руб.

$$Z_{DD} = Z_{DD(t)} t_{DD}, \quad (3)$$

где $Z_{DD(t)}$ – затраты по доставке запасной детали, осуществляемой в течение единицы времени, руб.;

t_{DD} – длительность доставки запасной детали, ч.

$$P_{\Pi} = P_{PP} + P_{ND}, \quad (4)$$

где P_{PP} – понесенные из-за простоя расходы (зарплата рабочих основного производства за время вынужденного простоя и др. расходы), руб.;

P_{ND} – неполученные из-за простоя доходы (упущенная выгода в результате простоя) [16, 17], руб.

$$P_{PP} = P_{PP(t)} t_{\Pi} \quad (5)$$

и

$$P_{ND} = P_{ND(t)} t_{\Pi}, \quad (6)$$

где $P_{PP(t)}$ – расходы, понесенные из-за простоя в течение единицы времени, руб.;

$P_{ND(t)}$ – доходы, неполученные из-за простоя в течение единицы времени, руб.;

t_{Π} – длительность простоя, ч.

$$t_{\Pi} = t_{PP} + t_{ID} + t_{DD}, \quad (7)$$

где t_{PP} – длительность проведения ремонтных работ по замене детали, ч.;

t_{ID} – длительность изготовления запасной детали, ч.

С учетом формул (2) – (7) формулу (10) можно представить в следующем виде:

$$Z_P = Z_{PP} + Z_{DD(t)} t_{DD} + C_D + (P_{PP(t)} + P_{ND(t)})(t_{PP} + t_{ID} + t_{DD}). \quad (8)$$

Проводя по формуле (1) расчет затрат, связанных с внеплановым ремонтом машин, и сравнивая полученные значения для разных вариантов изготовления запасной детали с применением АМ-технологий, можно сделать заключения о целесообразности применения одного из них, а именно того, для которого величина затрат оказывается наименьшей.

Как указывалось выше, каждый из возможных вариантов изготовления запасной детали характеризуется предварительно сделанным выбором применяемых АМ-технологий (в том числе в сочетании с традиционными технологиями), предприятия-изготовителя и способа доставки детали от предприятия-изготовителя к месту ремонта.

В формуле (8) регулируемые параметрами являются:

– C_D и t_{ID} – зависят от выбранной технологии изготовления запасной детали;

– $Z_{DD(t)}$ и t_{DD} – зависят от выбранного транспортного средства доставки запасной детали, кроме того, t_{DD} зависит от удаленности выбранного предприятия-изготовителя от предприятия, осуществляющего ремонт.

С уменьшением этих параметров затраты, связанные с ремонтом машин, также уменьшаются. Следовательно, из возможных вариантов изготовления запасной детали следует выбирать тот, который приводит к уменьшению этих параметров. При этом необходимо учитывать, что влияние значения каждого из этих параметров на общую величину затрат может быть различным.

Рассмотрим для примера особенности выбора варианта изготовления запасной металлической детали с применением АМ-технологии исходя из условия минимизации затрат, связанных с ремонтом, рассчитываемых по формуле (8).

Важнейшим параметром, определяющим выбор варианта изготовления запасной детали, является ее стоимость (C_D). В настоящее время металлические детали, получаемые с применением АМ-технологий прямого изготовления, оказываются весьма дорогими. Например, часто применяемая для этого технология SLM (Selective Laser Melting) характеризуется высокой стоимостью SLM-оборудования, а также расходных материалов в виде специально приготовленных металлических порошков [12]. Следует ожидать, что в ближайшем будущем данная проблема будет снята, поскольку по мере развития АМ-технологий их применение становится все более дешевым.

При определенных условиях может оказаться довольно выгодным изготавливать деталь по традиционным технологиям с помощью сравнительно недорогой формообразующей оснастки, полученной с применением АМ-технологий. Например, можно изготавливать деталь путем литья по выжигаемым полимерным моделям, изготовленным по Ink-Jet-технологии [12].

Немаловажным параметром, определяющим выбор варианта изготовления запасной детали, является длительность ее изготовления t_{ID} , которая может быть существенно сокращена благодаря применению АМ-технологий. Особенно значительный выигрыш во времени достигается при создании с помощью АМ-технологий формообразующей оснастки.

Параметры $Z_{DD(t)}$ и t_{DD} могут оказывать влияние на выбор предприятия-изготовителя запасных деталей. На сегодняшний день во многих странах АМ-технологии еще не получили широкого распространения. Поэтому нередко приходится заказывать изготовление АМ-изделий на далеко расположенных предприятиях, в том

числе находящихся за рубежом, что приводит к увеличению значений $Z_{дд(0)}$ и $t_{дд}$. Ожидается, что с развитием АМ-технологий будет реализована концепция распределенных производств, согласно которой предприятия, производящие АМ-изделия, будут располагаться вблизи потребителей этих изделий.

При выборе варианта изготовления запасной детали следует учитывать, что роль параметров $t_{ид}$ и $t_{дд}$, которыми определяется время простоя, может стать крайне важной в случае возникновения рисков получения больших убытков от простоя.

Заключение

Предложен алгоритм информационно-аналитических мероприятий по оценке целесообразности применения АМ-технологий для изготовления запасных деталей машин при внеплановых ремонтах. Рассмотрены особенности выполнения этих мероприятий с учетом современного уровня развития АМ-технологий, их достоинств и недостатков. Предложена методика расчета затрат, связанных с внеплановым ремонтом машин, для разных вариантов изготовления запасных деталей, в частности для разных видов применяемых АМ- и/или традиционных технологий, а также для разных предприятий-изготовителей и условий доставки деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. van der Haar. Assessing the appropriateness of additive manufacturing. Master thesis. University of Twente, Enschede, Netherlands, 2016. – 114 pp.
2. Weller, C. Economic Perspectives on 3D Printing. Doc. dissertation. Techn. University of Aachen, Germany, 2015. – 234 pp.
3. Mellor, S. Additive manufacturing: A framework for implementation / S. Mellor, L. Hao, D. Zhang // Int. J. Production Economics. – 2014. – Vol. 149. – P. 194-201.
4. Lindemann, C. Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing / C. Lindemann, T. Reiher, U. Jahnke, R. Koch // Rapid Prototyping J. – 2015. – № 21 (2). – P. 216-227.
5. Baumers, M. Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption. Doc. thesis. Loughborough University, UK, 2012. – 266 pp.
6. Чеботарев, М.И. Проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК / М.И. Чеботарев, И.Г. Савин // Науч. журнал КубГАУ. – 2014. – №97 (03). – С. 1-10.
7. Королькова, Л.И. Методы расчета показателей надежности сельскохозяйственной техники, производственных процессов ее ремонта и прогнозирования запасов: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.03 / Л.И. Корольков. – Челябинск, 2003. – 372 с.
8. Исследование причин отказов деталей зарубежной и отечественной лесозаготовительной техники / В.А. Марков [и др.] // Изв. СПбГЛТУ. – 2016. – Вып. 210. – С. 8-17.
9. Худова, А.Ю. Разработка программного средства для обеспечения запасными частями горной техники / А.Ю. Худова // Молодежь и наука: сб. матер. VIII Всерос. научно-тех. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012 [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section12.html>. – Дата доступа: 17.01.2018.
10. Ходина, А.И. Создание системы автоматизированного управления пополнением склада запасных частей для предприятия по ремонту дорожно-строительной техники / А.И. Ходина // Автоматизация и управление в технических системах: сб. науч. тр. МАДИ. – М., 2012. – Вып. 2. – С. 19-21.
11. Филатов, М.И. Формирование резерва запасных частей для ремонта транспортно-технологических машин / М.И. Филатов, О.В. Юсупова // Вестник Оренбургского гос. ун-та. – 2014. – № 10 (171). – С. 213-218.
12. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пос. для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
13. Головин, С.Ф. Повышение готовности машин при улучшенном сервисе / С.Ф. Головин // Механизация строительства, 2010. – № 37. – С. 9-15.
14. Симон, Д.В. Модульный принцип повышения эксплуатационной надежности зерноуборочных комбайнов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Д.В. Симон. – Ростов-на-Дону, 2016. – 218 с.
15. Тимофеев, А.М. Повышение эффективности работы технологических комплексов машин природообустройства с учетом их надежности при обводнении торфяников: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.М. Тимофеев. – Москва, 2013. – 19 с.
16. Сорвина, О.В. Контроль затрат промышленного предприятия на техническое обслуживание и внеплановый ремонт технологического оборудования на основе критериев оценки результативности ремонтного обслуживания / О.В. Сорвина // Известия ТулГУ: серия экон. и юрид. наук. – 2015. – № 4. – Ч. 1. – С. 432-436.
17. Конорева, Т.В. Методические аспекты экономического обоснования убытков компаний в результате вынужденных простоев / Т.В. Конорева, Л.Н. Гребенюк // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. – 2016. – № 3. – С. 46-52.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 08.02.2018