

параметры процесса (геометрия ролика и сила его прижатия), можно получать благоприятные для данной конструкции распределения остаточных напряжений [10].

Также для упрочнения резьбовых соединений бурильных труб создан стенд для упрочнения впадин резьбы бурильных труб. Пластическое деформирование впадин наружной конической резьбы осуществляется с помощью двух самоустанавливающихся роликов при действии радиальной силы, передаваемой с помощью гидросистемы от гидростанции. Сравнение результатов усталостных испытаний показало увеличение наработки обкатанного резьбового соединения над неупрочненным в 2,7...3,7 раза.

Таким образом, в результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- наиболее частой причиной преждевременного выхода из строя бурильных труб становится разрушение резьбового соединения «ниппель-муфта»;
- эффективным технологическим методом, повышающим усталостную прочность резьбовых соединений и имеющим минимальные затраты, является метод поверхностной пластической деформации;
- выполнено компьютерное моделирование процесса упрочнения впадины резьбы обкаткой роликом;
- создан стенд для упрочнения впадин резьбы бурильных труб.

Литература.

1. Chumakov R. Optimal control of screwing speed in assembly with thread-forming screws // International Journal Manufacturing Technology. – 2008. – №36. – P. 395-400.
2. Yanko V.M. Increasing Joint Life and Reliability by Surface Treatment of Thread on Titanium Pipe // Russian Engineering Research. – 2014. - №2. – P. 59-70.
3. X.-H. Zhu The parameter sensibility analysis for fishing box tap based on the overall process of elastoplasticity in oil and gas wells // Mathematical and Computer Modeling. - 2013. - №58. - P. 1540-1547.
4. Macdonald K.A. Failure analysis of drillstrigs // Engineering Failure Analysis. - 2007. - №14. - P. 1641-1666.
5. Ежелев А.В. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием // Fundamental Research. – 2012. – №6. – С. 642-646
6. Волков А.Н. Исследование влияния методов ППД на структуру поверхностного слоя и сопротивление усталости // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. - №3 (34). – С. 153-156
7. Burkhanov G.S. Plastic Deformation Nonuniformity and Localization during Metal Forming // Russian Metallurgy (Metally). – 2012. – №7. – P. 592-598.
8. Гуров Р.К. Определение условий отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием статическими методами // Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технологии. – 2011. - №2. С. 8-12.
9. Guoqing Y. Three-dimensional Finite Element Analysis of the Mechanical Properties of Helical Thread Connection. // Chinese Journal of mechanical engineering. – 2013. - №3. P. 564-572.
10. Песин М.В. Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы бурильных труб обкатыванием роликом // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. - №5(30). - С. 68-70.

АНАЛИЗ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*С.И. Петрушин, д.т.н., проф., Р.Х. Губайдулина, к.т.н., доц., Г.Д. Давлатов, студент
Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (8384-51)7-77-61
E-mail: victory_28@mail.ru*

Введение

В последние годы появился такой комплексный показатель времени существования изделий машиностроения, как «жизненный цикл изделия», под которым понимается полный период его жизни, включающий этапы проектирования, производства, эксплуатации и утилизации. Сейчас приходят к необходимости создания глобальной автоматизированной информационной системы, охватывающей весь этот цикл, которая обозначается аббревиатурой PLM (Products Lifecycle Management) [1,2]. Прежде чем разрабатывать PLM-систему, необходимо подвергнуть комплексному анализу весь процесс управления жизненным циклом изделия машиностроения [3,4].

Результаты и обсуждение

В концепции PLM полагается, что изделие вначале возникает у автора в виде общей идеи конструкции. Затем эта руководящая идея воплощается в комплект необходимой конструкторской до-

кументации. В процессе конструирования решается первая задача оптимального проектирования со своими критериями и целями оптимизации, в основу которой должны быть положены требования, как производства, так и эксплуатации изделия [3-6].

На следующем этапе в процесс создания изделия вовлекается большое количество специалистов и материальных средств, в результате чего осуществляется стадия производства машины с определенной серийностью выпуска. При этом встает вторая задача оптимизации, которая, как правило, направлена на всемерное снижение издержек производства, а также на своевременный переход к выпуску принципиально нового изделия.

После реализации изделия на рынке наступает этап его эксплуатации у потребителя, интересы которого требуют рассмотрения третьей задачи оптимизации, а именно: минимизации эксплуатационных расходов и установления оптимального срока эксплуатации, по завершению которого изделие подлежит замене на новое и происходит его утилизация [4.5].

Утилизация машины является завершающим этапом жизненного цикла изделия. Обычно рассматривается незамкнутый цикл, то есть предполагается, что изделие, проходя последовательно через этапы маркетинговых исследований, проектирования, изготовления, эксплуатации и утилизации, прекращает своё существование, удовлетворив таким образом определённые личные или общественные потребности. В то же время известно, что подобные незамкнутые функциональные цепи с точки зрения теории автоматического регулирования и управления являются неэффективными. Для повышения управляемости и устойчивости система должна быть замкнута путём введения обратной связи, в качестве которой предлагается применить этап утилизации [5].

На рис.1 приведен вариант функционирования замкнутой PLM-системы применительно к машиностроительному предприятию. Всё управление сосредоточено в блоке маркетинга, которому кроме изучения и анализа рынка, придается еще другое содержание. Главная задача этапа маркетинга заключается в разработке технико-экономического обоснования и технического задания (ТЗ) на проектирование изделия. В то же время в его функции должны входить: определение экономически обоснованного срока службы машины T_E , периода морального износа данной конструкции машины T_M , оптимальной программы выпуска изделий N_{max} , плановой цены изделия K_p , лимитов текущих расходов и капитальных вложений в производство, оптимальной величины такта выпуска изделий, плановой прибыли предприятия и ряда других макроэкономических показателей. Определённая на этом этапе величина T_E должна являться директивой для оптимального конструирования машины по критерию равного запаса надёжности и одновременно – рекомендацией для потребителя в техническом паспорте на эксплуатацию изделия. Цена продажи изделия и её изменение в зависимости от текущей ситуации, основанные на принципах определения справедливой для производителя и потребителя цены, передаётся рынку, а через обратную связь производится её непрерывный мониторинг. Блок маркетинга управляет также стратегическим планированием этапа изготовления, определяя через величину периода морального износа момент перехода на изготовление новой конструкции изделия. Для решения этих задач данный блок получает от службы утилизации оперативную информацию для определения текущих затрат на эксплуатацию изделия, по величине которой оцениваются T_E , K_p и др.[4].

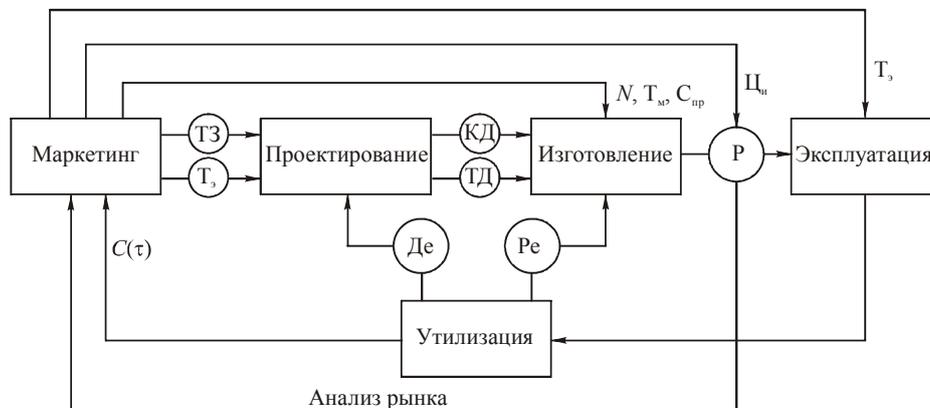


Рис. 1. Замкнутый ЖЦИ: ТЗ – техническое задание; КД – конструкторская документация; ТД – технологическая документация; Р – рынок; Де – дефектация; Ре – реновация

Цель утилизации изделия связана с одной стороны, со снижением экологической нагрузки на окружающую среду, а с другой – с оптимизацией ЖЦИ и, более того, с его замыканием по типу положительной обратной связи. При этом следует различать две задачи этого этапа, а именно: дефектация изношенной машины и реновация её частей. [3,5].

Главная задача дефектации изношенной машины заключается в получении исходной информации о величине нарушений работоспособности как изделия в целом, так и его составных частей, агрегатов, узлов и сопряжений, с последующей статистической обработкой результатов такого рода мониторинга. Так как в этих данных в первую очередь заинтересованы конструктор и производитель изделий, то на машиностроительном предприятии необходимо создавать отдельную службу, которая должна заниматься возвратом и утилизацией отслуживших свой срок машин.

Процесс контроля дефектов должен проводиться по специально разработанным методикам с широким привлечением современных средств дефектоскопии. Одновременно с этим контролем должна проходить сортировка частей машины на предмет либо их последующего восстановления и повторного использования в новых экземплярах изделий, либо для их переработки в исходный материал.

Для эффективного проведения рассматриваемого этапа конструкция любой машины должна быть доработана в плане обеспечения полноценной диагностики её текущего и конечного состояния. В первую очередь, она должна быть оснащена микрочипами, выдающими информацию об интенсивности эксплуатации изделия, как во времени его использования, так и с точки зрения режимов его работы. Именно эти данные позволяют уточнить закономерности «физического износа» изделия и на этой основе определить экономически обоснованный срок службы, проектную цену изделия и др. [4].

Часть сборочных единиц и деталей машины, отслужившей свой срок службы, по итогам дефектации могут оказаться вполне добротными. К ним, как правило, относятся базовые и корпусные части изделия, которые проектируются с большим запасом прочности и долговечности в связи с тем, что их выход из строя приводит зачастую к преждевременному отказу всей машины. Вообще говоря, чем больше в конструкции изделия подобных частей, тем менее оптимальной является данная конструкция. В то же время эти детали машин можно без существенных дополнительных затрат восстановить и использовать либо для сборки аналогичных изделий, если они ещё не сняты с производства, либо в качестве запасных частей в службе технического сервиса. Для этого в настоящее время разработан целый спектр технологий ремонтного машиностроения, позволяющих практически полностью восстановить срок службы изделия [3,4].

Поставленные выше три задачи оптимизации ЖЦИ тесно взаимосвязаны между собой и, более того, неравнозначны. В большинстве случаев товарно-рыночных взаимодействий между производителем изделия и его потребителем существует так называемый «диктат потребителя», когда последний определяет целесообразность приобретения того или иного изделия, исходя из понимания своих потребностей и финансовых возможностей. С другой стороны возможен и «диктат производителя», особенно в монополярной экономике, где у потребителя отсутствует выбор при покупке изделия. Так как в крупных экономиках мира существует антимонопольное законодательство, то этот вариант встречается сравнительно редко и не характерен для развитых товарно-денежных отношений. Отсюда следует, что третья задача оптимизации (оптимизация периода эксплуатации) является главной и определяющей в создании оптимальной экономики производства изделий, а две первые носят подчиненный характер [3,4].

Потребитель на стадии эксплуатации изделия с одной стороны получает полезный эффект от его использования, а с другой стороны – несет эксплуатационные затраты, которые делятся на первоначальные и текущие. К первоначальным затратам потребителя относятся стоимость изделия и издержки, необходимые на монтаж и запуск изделия в эксплуатацию. Они играют ту же роль, что и капитальные вложения на стадии производства. Текущие издержки зависят от назначения и конструкции изделия и могут включать затраты на электроэнергию, топливо, техническое обслуживание, запасные части и тому подобное. Их назначение аналогично себестоимости в производственном процессе. Для определения затрат на эксплуатацию изделия рекомендуется применить следующую формулу [4]:

$$C = C_K \cdot \tau + \frac{K_P}{\tau + 1}, \quad (1)$$

где через C_K обозначен коэффициент, имеющий размерность $\text{у.е.с.}/(\text{у.е.в.})^2$; τ - текущий срок эксплуатации изделия, у.е.в.; K_P - цена изделия, у.е.с. (у.е.в. – условные единицы времени; у.е.с. – условные единицы стоимости).

На рис.2 приведены расчеты зависимости (1) для различных значений Π при постоянной величине $C_K = 200$. Как из него следует, все кривые имеют глобальный минимум удельных приведенных затрат потребителя при определенном сроке эксплуатации изделия. Обозначим величину этого срока службы через T_E и назовём её «экономически обоснованным сроком службы» (ЭОСС), под которым в дальнейшем будем понимать такой период времени эксплуатации изделия, по истечению которого удельные приведенные затраты потребителя достигают своего минимального значения. Эксплуатировать изделие далее становится нерентабельным, и оно подлежит замене, как правило, на более совершенное [6].

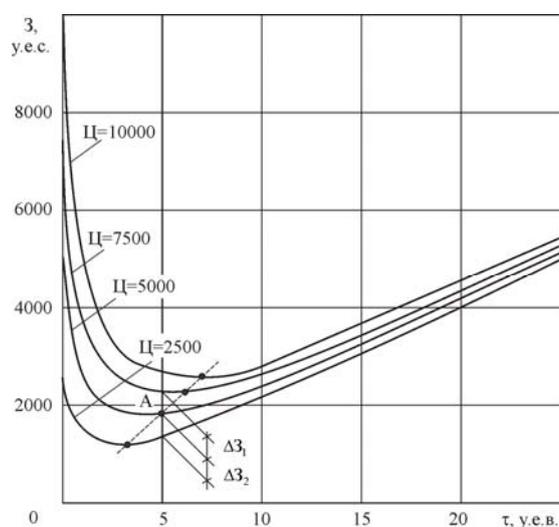


Рис. 2. Зависимости текущих приведенных затрат на эксплуатацию изделия при различных ценах его реализации

Значение ЭОСС можно получить из выражения (1), взяв от него производную по времени τ и приравняв ее к нулю:

$$T_E = \sqrt{K_P / C_K}, \quad (2)$$

Из (2) следует, что величина ЭОСС зависит не от абсолютных значений первоначальных затрат на приобретение изделия K_P и не от уровня удельных текущих затрат на его эксплуатацию C_K , а от их соотношения. Чем выше отношение цены изделия к текущим затратам, тем больше должен быть оптимальный срок его эксплуатации, и наоборот. Обращает на себя внимание то, что с уменьшением цены изделия уменьшается и его ЭОСС (см. штриховую линию на рис.1), то есть дешевое изделие должно иметь меньший оптимальный срок эксплуатации. Но более важным выводом из приведенных зависимостей является тот факт, что между ценой данного изделия и его ЭОСС существует жесткая функциональная связь. Она проявляется следующим образом: для известных величин C_K и T_E цена изделия K_P не должна назначаться произвольно, а должна иметь вполне определенное оптимальное значение (справедливая цена). Проанализируем этот эффект подробнее на примерах.

Возьмем за основу кривую, соответствующую первоначальным затратам на приобретение изделия $K_P = 5000$ у.е.с. Координаты оптимальной точки A для этой зависимости равны (см. рис.1): $T_E = 5$ у.е.в.; $C_{\min} = 1833$ у.е.с.. Рассмотрим два варианта произвола в назначении цены изделия, соответствующие $K_P = 7500$ у.е.с. и $K_P = 2500$ у.е.с. В первом случае мы имеем совместный финансо-

вый выигрыш производителя и продавца изделия в размере $\Delta C_1 = 417$ у.е.с. (см. рис.1), а во втором – выигрыш потребителя величиной $\Delta C_2 = 416$ у.е.с.. Иными словами первому варианту соответствует «диктат производителя», а второму – «диктат потребителя» изделия. Чтобы одновременно удовлетворить интересы всех сторон акта купли – продажи, цена изделия должна соответствовать своему оптимальному значению, которое можно рассчитать по следующему выражению:

$$K_P = C_K \cdot T_E^2. \quad (3)$$

Таким образом, только точное соответствие между плановыми и фактическими удельными текущими затратами на эксплуатацию изделия приводит к балансу экономических интересов в связке «производитель – потребитель» и дает приемлемый (оптимальный) результат для обоих контрагентов.

На основе проведенного анализа можно сформулировать следующий принцип оптимальной эксплуатации любого изделия машиностроения: для минимизации совместных издержек потребителя и производителя изделие конкретной конструкции и качества должно эксплуатироваться в течение экономически обоснованного срока его службы, значение которого обусловлено величинами первоначальных затрат на приобретение и текущих затрат на эксплуатацию данного изделия [4.6].

С другой стороны, если задан оптимальный срок службы изделия и установлены удельные эксплуатационные расходы, то для минимизации суммарных затрат производителя и потребителя цена изделия должна иметь также вполне определенную величину, превышение или уменьшение которой приводит к проигрышу либо потребителя, либо производителя изделия. Эта цена является оптимальной (справедливой) как для стадии изготовления, так и эксплуатации изделия, и должна служить директивой для изготовителя вместе с продавцом. Поэтому в отличие от пресловутой «стихии рынка», устанавливающей цену продукции на основе конкурентной борьбы, ценообразование в соответствии с ЭОСС позволяет внести существенный элемент плановости в деятельность машиностроительной фирмы как в случае освоения выпуска нового варианта изделия, так и в решении иных производственных задач [6].

Из изложенного следует, что этап проектирования изделия машиностроения должен быть направлен в первую очередь на обеспечение его ЭОСС и требуемых текущих затрат на эксплуатацию. При этом методология конструирования машины должна предусматривать достижения равного запаса долговечности для всех ее составных частей. Оптимальной является конструкция, спроектированная на принципах равнопрочности, равномерного изнашивания и других частных целевых функций, обеспечивающих равномерное распределение эксплуатационных свойств (равная жесткость, равномерная коррозионная стойкость и др.). При разработке конструкции машины необходим активный поиск наиболее оптимальной формы деталей, узлов и машины в целом и оптимального распределения физико-механических свойств конструкционного материала. Идеальное изделие может быть спроектировано только путем одновременной оптимизации формы и материала [7,8]. Эти принципы проектирования позволяют принудительно ограничить срок службы изделия величиной ЭОСС. Тогда перед потребителем встанет задача приобретения новой, более совершенной машины, а изготовитель сможет точно планировать объемы и перспективы развития своего производства на основе постоянных связей с клиентами.

В общем виде задача создания оптимального с рассматриваемой точки зрения проекта изделия должна иметь следующую последовательность решения [4,8]:

1. Определение оптимальной долговечности детали на основе экономически обоснованного срока службы машины.
2. Расчет по критерию равнопрочности спектра оптимальных форм изделия из заданного материала, нагруженного как сосредоточенной, так и распределенной силовой и тепловой нагрузкой.
3. Определение оптимальной структуры материала изделия заданной формы по условию равнопрочности.
4. Синтез спектра оптимальных решений по форме и вариантов проектов с оптимальным распределением физико-механических свойств материала изделия по условию равнопрочности. Этот этап должен решаться методом последовательных приближений, а именно: получив первое решение по равнопрочной форме, рассматривается соответствующее ей распределение модуля упругости материала детали, а затем вновь численным методом создается оптимальный профиль в соответствии с

измененным НДС, и так далее. Расчёт ведётся до тех пор, пока форма изделия не начнёт соответствовать структуре его материала с заданной степенью приближения.

5. Расчет спектра оптимальных проектов формы трущихся поверхностей изделия, изготовленного из определённого материала, по критерию равномерного изнашивания.

6. Определение оптимального распределения трибологических свойств поверхностей трения изделия и на этой основе разработка проектов нанесения селективно структурированных износостойких покрытий.

7. Синтез оптимальных проектов по форме и интенсивности изнашивания трущихся поверхностей, обеспечивающих режим равномерного изнашивания.

8. Оптимизация и синтез проектов изделия с равномерно распределёнными свойствами по другим критериям оптимизации (равномерная жёсткость конструкции, одинаковая коррозионная стойкость и т.п.).

9. Синтез спектра равнопрочных и равномерно изнашивающихся форм изделия с оптимизированной структурой его материала.

Последним этапом оптимального проектирования является выбор из полученных технически и технологически возможных вариантов наиболее экономичного путем сравнения его срока службы с экономической стойкостью (ЭОСС). В результате осуществления этой методологии конструирования должен быть получен оптимальный проект идеального изделия, обладающего для данных условий одновременно требуемой прочностью, износостойкостью и экономичностью[9-10].

ВЫВОДЫ

- Основой для оптимальной организации машиностроительного производства является экономически обоснованный срок службы изделия, которому соответствует минимум суммарных затрат потребителя и производителя машины.
- Конструкция машины и технология ее изготовления экономически взаимосвязаны через величину максимально возможной прибыли предприятия.
- Утилизация изделий должна осуществляться заводом-изготовителем и играть роль звена обратной связи для превращения всего ЖЦИ в устойчиво функционирующую самоорганизующуюся систему.
- Изложенные в данной работе принципы могут быть положены в основу разработки автоматизированной PLM-системы.

Литература.

1. Zheng Qing-chun, Hu Ya-hui, Lv Hui-juan Research on management for manufacturing information and integrated technology oriented to PDM/PLM // *Zuhe jichuang yu zidonghua jiagong jishu = Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique.*– 2008, № 7.– С. 84 – 86, 89.
2. Трифонов Д.С. Внедрение PLM –это, прежде всего, наведение порядка на предприятии. // *CAD/CAM/CAE информационно-аналитический PLM – журнал.* –2008, №7.– С.19–21.
3. Петрушин С.И. Техноэкономика. Оптимизация жизненного цикла изделий машиностроения. – Томск: Издательство ТПУ, 2010. – 139 с.
4. Петрушин С. И., Губайдулина Р. Х. Организация жизненного цикла изделий машиностроения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 200 с.
5. Петрушин С. И., Губайдулина Р. Х. Утилизация как замыкающий этап жизненного цикла изделия машиностроения // *Вестник машиностроения.* – 2012 – №. 9 – С.82 – 85.
6. Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х. Оптимизация перехода на производство новой продукции машиностроения. // *Вестник машиностроения.* – 2011, №12. – С. 80 – 83.
7. Saprykina N A, Saprykin A A, Borovikov I F, Sharkeev Y P, Influence of layer-by-layer laser sintering conditions on the quality of sintered surface layer of products, // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.*- 2015.- Vol.91. Article number 012031.- pp.1-6.
8. Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х. Оптимизация этапа эксплуатации изделий машиностроения // *Вестник машиностроения.* – 2010, №7. – С. 68 – 72.
9. Petrushin S.I., Gubaidulina R.H. New principles of mechanical engineering organization//*The 7th international Forum on Strategic Technology IFOST 2012 September 17 – 21, 2012. Tomsk polytechnic University. VOLUME II pp.129 – 133. [Электронный ресурс].– режим доступа: <http://www.tpu.ru>*
10. Губайдулина Р.Х., Петрушин С.И. Экономически обоснованная эксплуатация изделий машиностроения. Организатор производства, М.: «Экономика и финансы». Теоретический и научно-практический журнал – 2010. №3.– С.75–78.