

УДК 621.923

Ф.В. Новиков, проф., д-р техн. наук,
Харьковский национальный экономический университет
пр. Ленина 9а, г. Харьков, Украина, 61001
fokusnic1@rambler.ru kafitech@hneu.edu.ua

В.А. Жовтобрюх, канд. техн. наук,
ООО Технический Центр “ВариУс”,
спуск Калинина, 10, г. Днепропетровск, Украина, 49038
fokusnic1@rambler.ru

О.С. Кленов, канд. техн. наук,
Фирма “ДиМерус Инженеринг” ООО,
ул. Магаданская, 7, г. Харьков, 61054
fokusnic1@rambler.ru

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ОПЕРАЦИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Определены условия повышения эффективности механической обработки по критерию наименьшей технологической себестоимости. Установлено, что уменьшить себестоимость можно за счет увеличения производительности обработки, применяя сборные конструкции твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями. Стоимость инструмента при этом не является определяющим ограничивающим фактором, т.к. доля затрат на инструмент в суммарных затратах небольшая и не приводит к заметному увеличению себестоимости обработки. Приведены примеры разработки и внедрения эффективных операций механической обработки деталей гидравлических систем.

Ключевые слова: точение, инструмент, твердый сплав, производительность обработки

Введение и постановка проблемы. Детали гидравлических систем изготавливаются, как правило, из материалов с повышенными физико-механическими свойствами, что приводит к интенсивному износу режущих лезвийных инструмента и уменьшению их стойкости, резко снижает производительность и увеличивает себестоимость обработки. Повысить эффективность механической обработки данных деталей можно за счет применения современных металлообрабатывающих высокооборотных станков с ЧПУ типа “обрабатывающий центр”, реализующих условия высокоскоростного резания, и прогрессивных сборных конструкций режущих лезвийных инструментов с износостойкими покрытиями. Вместе с тем, эти станки и режущие инструменты зарубежного производства и весьма дорогостоящие, что приводит к увеличению себестоимости обработки и требует изыскания новых технологических решений по ее уменьшению при обеспечении требуемых показателей качества обрабатываемых поверхностей. В связи с этим в работе решается актуальная задача определения условий снижения себестоимости и повышения производительности на операциях механической обработки (точения, растачивания, сверления, фрезерования) деталей гидравлических систем за счет выбора оптимальных режимов резания и характеристик режущих лезвийных инструментов.

Анализ последних достижений и публикаций. Проведенный анализ литературных источников по данной теме [1,2] показал, что повысить эффективность обработки деталей гидравлических систем можно на основе выбора рациональных режимов резания и характеристик инструментов по критерию наименьшей технологической себестоимости обработки. Согласно существующим теоретическим решениям [3], основным условием уменьшения себестоимости обработки является повышение износостойкости режущих инструментов в особенности путем нанесения на их рабочие поверхности износостойких покрытий. При этом установлено, что при определенной (оптимальной) стойкости режущего инструмента технологическая себестоимость обработки принимает экстремальное (минимальное) значение. Поэтому определение оптимальных условий обработки на основе минимума технологической себестоимости следует рассматривать основной научной предпосылкой повышения эффективности операций механической обработки деталей гидравлических систем. Для этого важно аналитически описать технологическую себестоимость обработки и обосновать основные условия ее уменьшения, разработать инженерную методику выбора оптимальных параметров режима резания и характеристик лезвийных инструментов по критерию наименьшей себестоимости обработки. Важно также провести экспериментальные исследования основных технологических параметров операций механической обработки деталей гидравлических систем и оценить достоверность полученных теоретических результатов, разработать и внедрить в производство эффективные операции механической обработки деталей гидравлических систем.

Цель работы. Определение условий снижения себестоимости и повышения производительности на операциях механической обработки деталей гидравлических систем на основе научно обоснованного выбора оптимальных режимов резания и характеристик лезвийных инструментов.

Результаты исследований. Для достижения поставленной цели получена аналитическая зависимость для определения технологической себестоимости обработки с учетом четырех основных изменяющихся статей затрат, связанных с заработной платой рабочего, затратами на инструмент и его замену, а также затратами на электроэнергию [4]:

$$C = N \cdot t_0 \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N_0 \cdot t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N_0 \cdot \Pi + N \cdot P \cdot t_0 \cdot S_{\text{элект}} =$$

$$= \frac{\mathcal{G}_{\text{сум}} \cdot S_{\text{час}} \cdot k}{V \cdot t \cdot S} + \frac{\mathcal{G}_{\text{сум}}}{V \cdot t \cdot S \cdot T} \cdot (t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + \Pi) + \mathcal{G}_{\text{сум}} \cdot \sigma \cdot S_{\text{элект}}, \quad (1)$$

где N , $N_0 = N/n$ – количество обрабатываемых деталей и потребляемых режущих инструментов, шт.; $n = T/t_0$ – количество деталей, обработанных одним инструментом, шт.; T – стойкость инструмента, с; $t_0 = \mathcal{G}/Q$ – основное технологическое время обработки, с; \mathcal{G} – объем металла, снимаемого с 1 детали, м³; $Q = V \cdot t \cdot S$ – производительность обработки (при продольном точении), м³/с; V – скорость резания, м/мин; t – глубина резания, м; S – подача, м/об; $S_{\text{час}}$ – тарифная ставка рабочего, грн./с; k – коэффициент, учитывающий начисления на тарифную ставку рабочего; t_c – время замены инструмента, с; Π – цена инструмента, грн.; $P = \sigma \cdot Q$ – эффективная мощность резания, Вт; σ – условное напряжение резания (энергоемкость обработки), Н/м²; $S_{\text{элект}}$ – стоимость единицы электроэнергии, грн./Дж; $\mathcal{G}_{\text{сум}} = N \cdot \mathcal{G}$ – объем металла, снимаемого с N деталей, м³.

Экспериментально установлено, что параметр σ несущественно зависит от параметров режима резания, поэтому в первом приближении четвертое слагаемое зависимости (1) можно не рассматривать. Тогда, исходя из зависимости (1), основным условием уменьшения технологической себестоимости C и повышения производительности обработки Q является обеспечение постоянства произведения параметров $V \cdot T$ (т.е. длины пути резания) с увеличением скорости резания V . Это достигается повышением стойкости инструмента за счет применения новых инструментальных материалов и нанесения на них износостойких покрытий.

Установлено, что в случае уменьшения произведения параметров $V \cdot T$ с увеличением скорости резания V (в связи с увеличением температуры резания и уменьшением стойкости инструмента) технологическая себестоимость обработки C будет изменяться по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. В точке минимума технологической себестоимости основные параметры обработки с учетом известного соотношения [1] $T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}$ определяются следующими зависимостями:

$$V_{\text{экстр}} = \left[\frac{C_4 \cdot S_{\text{час}} \cdot k}{(t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + \Pi) \cdot (m_1 - 1) \cdot S^p \cdot t^q} \right]^{\frac{1}{m_1}} = \left[\frac{C_4}{T_{\text{экстр}} \cdot (m_1 - 1) \cdot S^p \cdot t^q} \right]^{\frac{1}{m_1}}, \quad (2)$$

$$Q_{\text{экстр}} = V_{\text{экстр}} \cdot S \cdot t = \left[\frac{C_4}{T_{\text{экстр}}} \cdot S^{m_1 - p} \cdot t^{m_1 - q} \right]^{\frac{1}{m_1}}, \quad (3)$$

$$T_{\text{экстр}} = \frac{(t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + \Pi) \cdot (m_1 - 1)}{S_{\text{час}} \cdot k}, \quad (4)$$

$$C_{\text{мин}} = \frac{N \cdot \mathcal{G} \cdot S_{\text{час}} \cdot k}{Q_{\text{экстр}}} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right], \quad (5)$$

где C_4, m_1, q, p – постоянные, определяются экспериментально ($m_1 > p > q$; $m_1 > 1$).

Из зависимости (5) вытекают основные условия уменьшения минимальной технологической себестоимости обработки $C_{\text{мин}}$, показанные на рисунке 1. Экспериментально установлено, что параметр m_1 для твердосплавных и быстрорежущих инструментов принимает значения, как правило, $m_1 \geq 5$. Тогда, в случае $m_1 = 5$ первое слагаемое в зависимости (5) в 4 раза больше второго слагаемого. Следовательно, минимальное значение технологической себестоимости обработки обусловлено статьей затрат, связанной с заработной платой рабочего, т.к. она в несколько раз превышает статью затрат на режущий инструмент. Поэтому эффект уменьшения технологической себестоимости обработки может быть достигнут главным образом за счет уменьшения данной статьи затрат, например, путем применения прогрессивных конструкций режущих инструментов, изготовленных из инструментальных материалов с повышенными физико-механическими свойствами.

С целью оценки достоверности полученных теоретических решений были проведены экспериментальные исследования по установлению оптимальной стойкости инструментов и себестоимости обработки на операции фрезерования деталей из труднообрабатываемого материала Х2ГСНВМ-ВД. Сравнивались два варианта фрезерования: монолитной концевой фрезой $\varnothing 40$ мм (изготовленной из быстрорежущей стали Р18) и сборной концевой фрезой $\varnothing 32$ мм (оснащенной пластинами из твердого сплава ТТ9030 с износостойким покрытием производства фирмы TaeguTec (Южная Корея)). Количество зубьев у фрез – 5; глубина резания – 2,5 мм; ширина резания – 6 мм; количество проходов – 12. Обработка сборной фрезой производилась с подачей $S = 0,75$ мм/об, а монолитной фрезой – с подачей $S = 0,3$ мм/об.

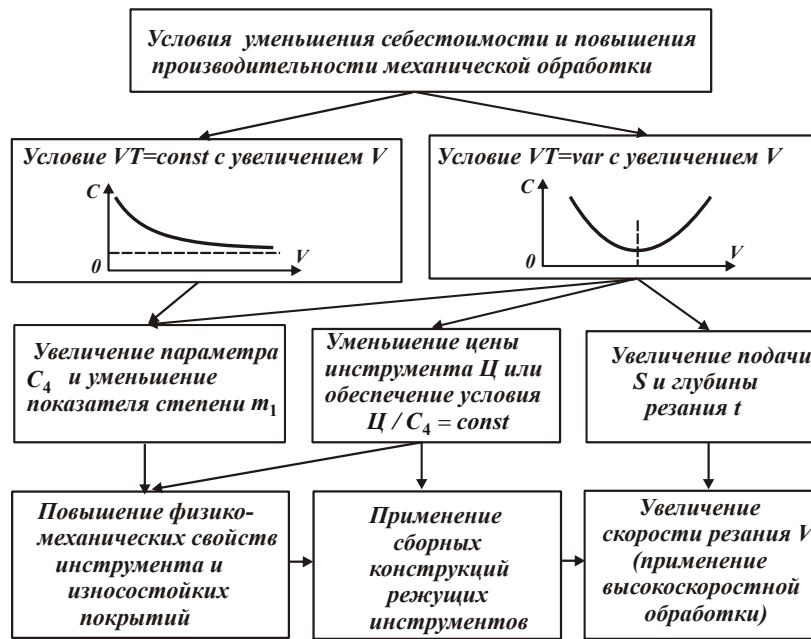


Рисунок 1 – Структурная схема условий уменьшения технологической себестоимости и повышения производительности механической обработки.

Экспериментально установлено, что при обработке сборной фрезой, несмотря на увеличенную подачу, технологическая себестоимость обработки C меньше, чем при обработке монолитной фрезой, а экстремум (минимум) технологической себестоимости обработки C достигается при значительно большей скорости резания ($V = 99$ м/мин против $V = 16$ м/мин для монолитной фрезы). Следовательно, при обработке сборной фрезой скорость резания V можно устанавливать в широких пределах, т.к. при этом технологическая себестоимость обработки существенно не изменяется.

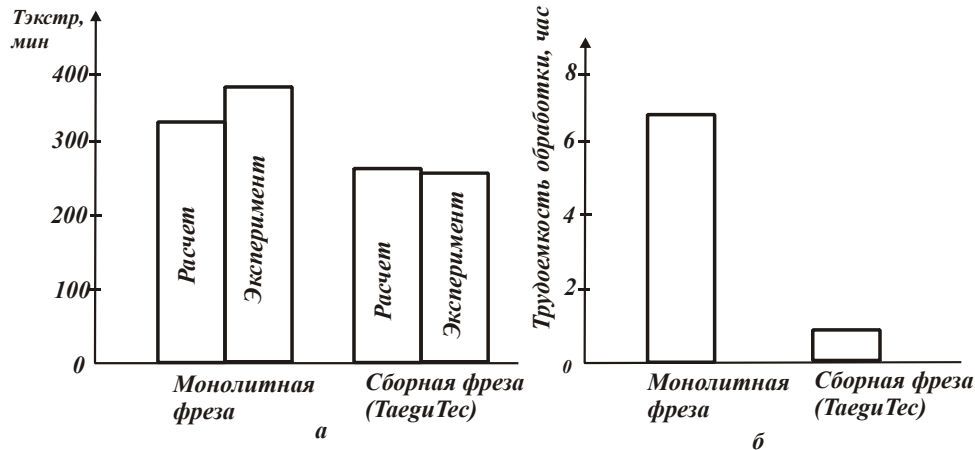


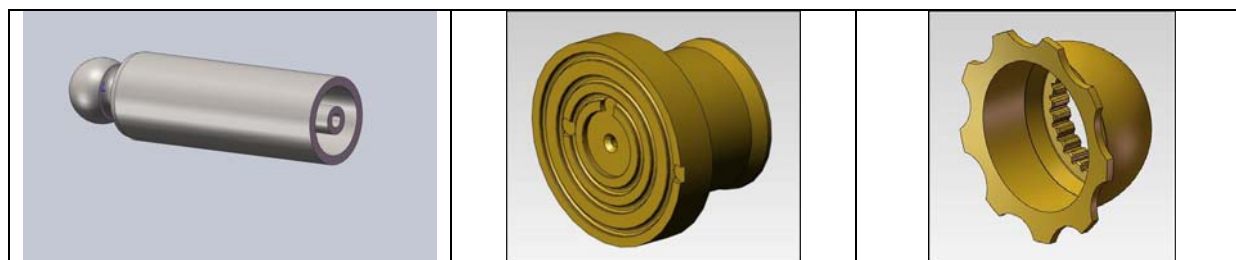
Рисунок 2 – Диаграммы распределения параметров $T_{экстр}$ (а) и трудоемкости обработки (б) монолитной и сборной концевыми фрезами.

Экспериментально установлено, что оптимальная стойкость сборной концевой фрезы составляет $T_{экстр} = 256$ мин, а монолитной концевой фрезы – $T_{экстр} = 384$ мин. Расчеты по зависимости (4) показали, что оптимальная (экономичная) стойкость рассматриваемых инструментов принимает значения, близкие к экспериментальным (рисунок 2,а). Их расхождение не превышает 15%, что свидетельствует о достоверности полученных теоретических решений. Следовательно, появляется возможность расчетным путем, не прибегая к выполнению трудоемких экспериментальных исследований, по зависимости (4) установить оптимальную (экономичную) стойкость инструмента, а по ней определить оптимальные параметры режима резания, минимальную технологическую себестоимость обработки и другие параметры процесса резания. Причем, данная зависимость является универсальной, справедливой для разных методов механической обработки.

Как установлено экспериментально, снижение затрат при обработке сборной фрезой привело к почти 10-кратному снижению трудоемкости обработки (рисунок 2,б). Этим показана эффективность применения с точки зрения снижения себестоимости обработки более производительного, хотя и дорогостоящего сборного твердосплавного инструмента, поскольку в этом случае, исходя из экспериментальных

данных, увеличение производительности обработки с избытком компенсирует затраты на их приобретение. При этом цену инструмента, по сути, определяет стоимость непереключаемой режущей пластины, которая за счет своей многогранности допускает многократное использование. В результате стоимость одной “условной” режущей кромки пластины резко уменьшается, что позволяет увеличить скорость резания и производительность и соответственно уменьшить себестоимость обработки.

Полученные результаты использованы для разработки и внедрения в производство эффективных операций механической обработки деталей гидравлических систем, в частности, таких ответственных деталей как плунжер, пята и сферическая втулка (рисунок 3). Плунжер изготавливается из стали 40ХФ2, а пята и втулка сферическая – из литейной латуни ЛМцСКА.



а б в
Рисунок 3 – Детали гидравлических систем: а – плунжер; б – пята; в – втулка сферическая

Обработка производилась на современном высокопроизводительном двухшпиндельном токарном обрабатывающем центре PUMA 2100MS с приводным фрезерным инструментом (ось С) и контр-шпинделем (“DOOSAN” производства Южная Корея), оснащенным револьверной головкой для смены инструмента и системой управления (ЧПУ) Fanuc Oi-TD. Для выполнения операций кольцевого фрезерования и глубокого сверления станок комплектовался мощной гидростанцией на 70 бар.

При разработке новой технологии механической обработки деталей гидравлических систем был сделан основной упор на фактор экономичности, связанный, с одной стороны, с повышением производительности и уменьшением себестоимости обработки, а с другой стороны, с универсализацией оборудования с ЧПУ путем применения нестандартных режущих инструментов и специальной оснастки.

Так, ранее рассмотренные детали: плунжер, пята и втулка сферическая обрабатывались на различном оборудовании. Даже отдельные операции приходилось выполнять на разных станках. Например, токарную обработку плунжера производили на одном оборудовании, а глубокое сверление – на специальном станке для глубокого сверления. В данный момент эти операции объединены и выполняются на одном станке “DOOSAN”. Кроме того, используя станки агрегатного типа, сложно корректировать размер обрабатываемой детали в связи с износом режущего инструмента. Для введения коррекции на агрегатном станке необходимо затрачивать более 5 минут. Для ввода коррекции на станке “DOOSAN” с ЧПУ – всего 20 секунд. Например, при обработке на агрегатном станке при обнаружении брака на 3-х обработанных деталях из 7, очевидно, и 4 последующие обработанные детали уйдут в брак. При использовании станка “DOOSAN” имеется возможность контролировать каждую деталь и таким образом исключается брак при обработке. При этом появляется возможность увеличения производительности обработки на каждой операции за счет того, что станок обладает повышенной жесткостью. Следовательно, применение такого оборудования как станок с ЧПУ “DOOSAN” позволяет решить проблему экономичности и производительности обработки главных образом за счет его универсализации, возможности обработки трех рассматриваемых типов деталей (плунжер, пята и втулка сферическая) на одном станке. При этом сокращаются затраты на энергоресурсы. Для обслуживания станка необходим один человек, тогда как для обработки данных деталей на агрегатных станках необходимо более 5 человек, что позволяет экономить фонд заработной платы рабочих. Кроме того, минимизируется количество бракованных деталей. Характеристики станка “DOOSAN” позволяют производить токарную обработку деталей различной конфигурации. В случае изменения конструкции детали, имеется возможность быстрой переналадки оборудования.

Согласно существующей технологии, полуставовая обработка наружной цилиндрической поверхности плунжера производилась обычным контурным резцом из твердого сплава Т15К6 с режимом резания: $V=40$ м/мин, $S=0,15$ мм/об, $t=1,0$ мм. С целью повышения производительности и снижения трудоемкости и себестоимости обработки предложено использовать сборный токарный резец со сменной многогранной пластиной ТТ8125 с износостойким покрытием. Благодаря высоким стойкостным характеристикам многогранных сменных пластин с износостойким покрытием удалось интенсифицировать режим резания: $V=100$ м/мин, $S=0,1$ мм/об, $t=2,0$ мм. Это позволило в 3 раза увеличить производительность обработки и главное – уйти от многочисленных перезаточек инструмента и таким образом уменьшить трудоемкость и себестоимость обработки. При этом, как установлено экспериментально, обеспечиваются требуемые показатели качества обработки.

Еще больший эффект был достигнут на операции чистовой токарной обработки, а также при формировании сферы и радиуса плунжера. Согласно действующей технологии, данная операция осу-

ществляется тем же твердосплавным резцом с режимом резания: $V=45$ м/мин, $S=0,1$ мм/об, $t=0,08$ мм. Взамен этого резца предложено использовать современный сборный токарный резец с углом в плане 93 градуса со сменной многогранной пластиной ТТ8115, которая по твердости выше твердости пластины ТТ8125 (используемой для полустойковой обработки). Режим резания: $V=250$ м/мин, $S=0,12$ мм/об, $t=0,3$ мм. В результате удалось повысить производительность обработки более чем в 10 раз.

Для сверления отверстий в плунжере по существующей технологии применялись центровочные сверла из быстрорежущей стали Р18 с режимом резания: $V=40$ м/мин, $S=0,1$ мм/об. Применение твердосплавного сверла с износостойким покрытием позволило увеличить скорость резания до $V=80$ м/мин при такой же подаче $S=0,1$ мм/об. С целью повышения производительности и качества обработки отверстий были разработаны и внедрены кардинально новые конструкции сверл для глубокого сверления отверстия $\varnothing 3,15$ мм с длиной режущей части 125 мм. Сверление рекомендуется производить с режимом резания: $V=60$ м/мин, $S=0,08$ мм/об.

По действующей технологии полустойковая обработка наружной цилиндрической поверхности детали “пята” производилась фасонным резцом из быстрорежущей стали Р18 с режимом резания: $V=100$ м/мин, $S=0,1$ мм/об, $t=2,0$ мм. Взамен этого инструмента был применен современный сборный токарный резец TDJNL 2525 M15 со сменной многогранной пластиной из сплава К10, состоящего из WC+Co. Обработка проводится на следующем режиме резания: $V=350$ м/мин, $S=0,25$ мм/об, $t=1,5$ мм. В результате производительность обработки увеличилась в 6 раз, почти в такое же количество раз уменьшилась себестоимость обработки.

Обработка 3-х глухих отверстий $\varnothing 3,18 \pm 0,24$ мм в детали “пята” ранее производилась специальным сверлом $\varnothing 3,18$ мм из быстрорежущей стали Р18 отечественного производства с режимом резания $V=30$ м/мин, $S=0,05$ мм/об. В последствии на этой операции предложено применять импортное твердосплавное сверло из ультрамелкозернистого твердого сплава UF10 с режимом резания $V=120$ м/мин, $S=0,07$ мм/об. Это позволило более чем в 5 раз повысить производительность обработки при одновременном уменьшении себестоимости обработки.

По действующей технологии операция полустойковой обработки наружной цилиндрической поверхности детали “втулка сферическая”, а также торцевой поверхности производилась фасонным резцом из быстрорежущей стали Р18 с режимом резания $V=100$ м/мин, $S=0,1$ мм/об, $t=2,0$ мм. Взамен этого инструмента был применен сборный токарный резец TDJNL 2525 M15 со сменной многогранной пластиной из сплава К10. Это позволило реализовать следующий режим резания: $V=350$ м/мин, $S=0,25$ мм/об, $t=1,5$ мм. Производительность обработки увеличилась более чем в 5 раз.

Растачивание, а также обработка торца втулки ранее выполнялись контурным резцом из быстрорежущей стали Р18 с режимом резания: $V=110$ м/мин, $S=0,08$ мм/об, $t=0,1$ мм. В данный момент обработка производится токарным резцом S25T SDUCR 11 с углом в плане 93 градуса, оснащенный пластиной из сплава К10 с режимом резания: $V=250$ м/мин, $S=0,2$ мм/об, $t=1,0$ мм. В результате достигнуто увеличение производительности обработки более чем в 10 раз.

Фрезерование круглых лысок (“звездочки”) по действующей технологии производилось фрезой $\varnothing 10$ мм из быстрорежущей стали с режимом резания: $V=30$ м/мин, $S=0,08$ мм/об. Данная фреза была заменена на фрезу из твердого сплава UF10. Это позволило интенсифицировать режим резания: $V=100$ м/мин, $S=0,15$ мм/об и более чем в 6 раз повысить производительность обработки.

Выводы. 1. Теоретически определены условия повышения эффективности механической обработки по критерию наименьшей технологической себестоимости. Установлено, что уменьшить себестоимость обработки можно главным образом за счет увеличения производительности обработки, применяя для этого прогрессивные конструкции сборного твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями. Стоимость инструмента при этом не является определяющим ограничивающим фактором, т.к. доля затрат на режущий инструмент в суммарных затратах небольшая и не приводит к заметному увеличению себестоимости обработки.

2. Произведена оценка экономической эффективности применения прогрессивных сборных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями при фрезеровании. Экспериментально установлено, что применение сборной концевой твердосплавной фрезы с износостойким покрытием взамен монолитной концевой фрезы позволяет многократно уменьшить технологическую себестоимость и повысить производительность обработки, несмотря на ее более высокую стоимость. Это связано с тем, что доля затрат на инструмент в себестоимости обработки небольшая, а эффект снижения себестоимости обработки от применения сборной фрезы достигается за счет многократного увеличения производительности обработки и соответственно уменьшения статьи затрат, связанной с заработной платой рабочего.

3. Экспериментально установлено, что применение прогрессивных сборных твердосплавных резцов с износостойкими покрытиями на операциях точения деталей гидравлических систем (плунжера, пяты, втулки сферической) взамен традиционно используемых резцов из быстрорежущей стали позволяет в 5 и более раз повысить производительность и примерно в такое же количество раз уменьшить себестоимость обработки. Экспериментально доказана возможность снижения трудоемкости и себестоимости обработки деталей гидравлических систем за счет универсализации оборудования с ЧПУ путем использования нестандартных режущих инструментов и специальной оснастки.

Библиографический список использованной литературы

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
3. Технологія машинобудування: підручник / О.В. Якимов, В.М. Царюк, О.О. Якимов, Г.О. Оборський, В.П. Ларшин, О.В. Самойленко. – Одеса: Астропринт, 2001. – 608 с.
4. Жовтобрюх В.А., Новиков Ф.В., Бенин Е.Ю. Определение оптимальных условий механической обработки по наименьшим затратам на операцию // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 9 (205). – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – С. 142-146.

Поступила в редакцію 28.02.2014г.