

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.7

Ажар А. В., Колесников Л. А., Яцкевич О. К.

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ОСЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Описывается имитационное моделирование процесса обработки осевым инструментом при автоматизированном производстве. Цель моделирования – выбор, как инструментов, так и режимов обработки по критерию минимальной стоимости изготовления детали. Учитывается как основное, так и вспомогательное время обработки, износ инструмента, а также стоимость оборудования. На примере типовой детали показана возможность снижения стоимости изготовления более чем в три раза при использовании комбинированных осевых инструментов и всех возможностей оборудования.

В настоящее время во всем мире происходит переход к автоматизированному производству, что обусловлено как техническими, так и социо-экономическими причинами. В этих условиях разработка технологии обработки и, в частности, выбор режимов резания низкой. Для современного высокопроизводительного и, вместе с тем, дорогого оборудования заметно усложнился. Традиционный критерий выбора режимов резания – производительность или скорость схема материала был приемлем, пока стоимость станков и инструментов была сравнительно приходится учитывать все аспекты его работы, например, изменение свойств СПИД в процессе работы, вероятностный характер самого процесса резания и т. д. Наиболее естественным методом анализа в этих условиях является имитационное моделирование, позволяющее относительно просто учесть все эти аспекты.

Целью такого моделирования будет являться оптимальный выбор, как инструментов, так и режимов обработки по критерию минимальной стоимости изготовления детали при заданном качестве. Из-за объема задачи ограничимся анализом только самого процесса обработки, в частности, исключив влияние т. н. накладных расходов. Такая модель предполагает непрерывную загрузку станка в течение заданного времени работы, без учета времени на организационные потери и т. д. Тогда основные компоненты стоимости изготовления, отнесенные к одной детали, в расчете на минуту, включает в себя:

– стоимость станка $C_{СТ}$, с учетом стоимости владения (техническое обслуживание, зарплата персонала, энергопотребление и т. п.);

– стоимость инструмента $C_{ИН}$, с учетом стоимости владения (восстановление, сборка, наладка вне и на станке и т. п.).

Тогда себестоимость изготовления одной детали $C_{ДЕТ}$, руб., определится как:

$$C_{ДЕТ} = t_{ДЕТ} \times (C_{СТ} + C_{ИН}), \quad (1)$$

где $t_{ДЕТ}$ – время изготовления детали, мин.

Стоимость станка в расчете на минуту включает в себя:

– себестоимость одной минуты работы станка и станочника без затрат на режущий инструмент и амортизацию, $C_{СТ}$, руб./ст-мин. Включает затраты на фонд оплаты труда

станочника, расходные материалы, электроэнергию. В первом приближении принимаем их постоянными, хотя в реальности себестоимость изготовления, например, в первую и третью смены может существенно отличаться;

– амортизацию станка C_{AM} , руб., приведенную к одной минуте существования станка на предприятии. Точный учет этой величины, с учетом преобладающей доли импорта технологического оборудования и волатильности экономики, едва ли возможен. Поэтому в качестве начального приближения примем следующую зависимость:

$$C_{AM} = \frac{C_{СТ}}{T_{ЭКС_СТ} \times 525600} \times k_{ФИН}, \quad (2)$$

где $C_{СТ}$ – начальная стоимость станка, руб.;

$T_{ЭКС_СТ}$ – расчетный срок эксплуатации станка, лет. Типичные значения для станков автоматизированного производства – 3 или 7 лет; принимаем $T_{ЭКС_СТ} = 7$ лет;

$k_{ФИН}$ – коэффициент, учитывающий приближенный характер расчета величины амортизации. В качестве начального приближения примем $k_{ФИН} = 2$;

52 5600 – число минут в году.

– стоимость простоя станка СПР, руб., приведенную к одной минуте работы станка.

Включает время простоя по организационным причинам, из-за ремонта, технического обслуживания и наладки, поломки или отсутствия дублирующего инструмента в магазине станка, а также стоимость брака по причине поломки или затупления инструмента. В отечественной реальности простои станков являются главной компонентой, влияющей на себестоимость изготовления. Но, поскольку в рамках данной работы основное внимание уделяется анализу оптимального использования инструмента, допустимо пренебречь потерями времени, напрямую не относящимися к процессу обработки. Поэтому в дальнейшем полагаем СПР = 0.

В условиях автоматизированного производства к собственно затратам на режущий инструмент следует добавить стоимость оснастки (патронов, переходников, установок для термозажима и т. п.) в расчете на один инструмент. Запасов комплектов «инструмент + оснастка» (наладка) должно хватать на заданное время безостановочной работы станка, непосредственно в магазине станка либо на складе, с возможностью автоматической загрузки на станок. Это, как минимум, 8 часов (одна смена). По опыту западных стран, следует ориентироваться на 24 часа (вторая и третья «безлюдные» смены). Предполагается, что сборка, контроль и настройка на размер наладки (инструмента) производится вне станка, на отдельном участке. В общем случае затраты на режущий инструмент ЦИН, руб./мин, можно записать в виде:

$$C_{ИН} = \frac{C_{ИНСТР} + k_{ОПР} \cdot C_{ОПР}}{T_{ЭКС_ИН} \cdot 525600} \cdot k_{ФИН} + \frac{[C_{ИНСТР} + n_{ПЕР} \cdot C_{ВОССТ}] \cdot k_{ПОТЕРЬ}}{T \cdot n_{ПЕР}}, \quad (3)$$

где $C_{ИНСТР}$ – стоимость режущего инструмента, руб.;

$C_{ОПР}$ – средняя стоимость оправки, руб.;

$k_{ОПР}$ – число переходников, приходящихся на один инструмент;

$T_{ЭКС_ИН}$ – время эксплуатации инструмента до наступления предельного состояния, лет;

$C_{ВОССТ}$ – средняя себестоимость восстановления инструмента, руб., например, переточки, нанесения покрытия и т. д. Оценить эту величину можно как разницу между закупочной стоимостью инструмента и стоимостью при возврате его поставщику;

$n_{ПЕР}$ – число циклов восстановления инструмента;

T – время работы инструмента до замены, мин;

кпотерь – коэффициент, учитывающий случайную убыль инструмента. В первом приближении кпотерь допустимо принимать равным 1,2.

Зависимость (3) предполагает мгновенное восстановление и загрузку наладок в магазин станка. Корректировка подобных допущений требует вероятностной модели работы автоматизированного производства и может быть проведена по мере уточнения модели.

Время работы осевого инструмента до замены T определяется из достижения предельных значений следующих параметров:

- крутящий момент, обеспечиваемый главным приводом станка МКР; Н×м;
- осевая сила P , Н;
- мощность резания $N_{\text{РЕЗ}}$, Вт;
- радиальный износ инструмента Δi .

Для силовых параметров обработки принимаем следующие зависимости [1]:

$$M_{\text{МКР}} = \frac{D^2 \cdot f_n}{8000 \cdot \eta} \cdot \frac{k_{\text{C0}}}{\left(\frac{f_n}{2} \cdot \sin(\varphi)\right)^{mc}} \cdot \left(1 + A \cdot B^{\Delta/100}\right), \quad (4)$$

$$P = 0,5 \cdot \frac{D}{2} \cdot f_n \cdot \frac{k_{\text{C0}}}{\left(\frac{f_n}{2} \cdot \sin(\varphi)\right)^{mc}} \cdot \left(1 + A \cdot B^{\Delta/100}\right), \quad (5)$$

$$N_{\text{РЕЗ}} = \frac{D \cdot f_n \cdot V}{240 \times \eta} \cdot \frac{k_{\text{C0}}}{\left(\frac{f_n}{2} \cdot \sin(\varphi)\right)^{mc}} \cdot \left(1 + A \cdot B^{\Delta/100}\right), \quad (6)$$

где D – диаметр инструмента, мм;

f_n – подача на оборот, мм/об;

η – КПД станка; принимаем $\eta = 0,95$;

k_{C0} – удельная сила резания, Н/мм²;

φ – главный угол в плане, град;

mc – коэффициент; для сталей $mc = 0,25$; для чугунов $mc = 0,32$ [2];

Δ – степень износа инструмента, %;

A, B – коэффициенты; $A = 0,09$; $B = 128,5$ для широкого диапазона обрабатываемых материалов (от серого чугуна до улучшенной легированной стали).

Характеристики осевых инструментов примем по данным SECO [3]. Стойкость инструмента T определим по линеаризованной зависимости (7):

$$T = 124,37 - 108,814 \cdot \frac{V_{\text{РЕЗ}}}{V_{\text{КАТ}} \cdot K_V}, \quad (7)$$

где $V_{\text{РЕЗ}}$ – скорость резания, м/мин;

$V_{\text{КАТ}}$ – рекомендуемая (базовая) скорость резания из каталога производителя инструмента, м/мин;

K_V – коэффициент учитывает влияние твердости обрабатываемого материала [4].

Степень износа инструмента Δ , %, принимаем равным отношению текущего значения радиального износа Δi к максимальному значению, которое считаем равным половине допуска h на отверстие:

$$\Delta = \frac{\Delta i}{h/2} \cdot 100, \quad (8)$$

$$\Delta_i = I \cdot t, \quad (9)$$

где t – время, мин;

I – скорость изнашивания. Для современных марок твердых сплавов выражение для скорости изнашивания I , мм/мин, имеет следующий вид [5]:

$$I = 1,03 \times 10^7 \cdot K_I \cdot \left(\frac{V}{60 \cdot HV} \right)^{2,47}, \quad (10)$$

где K_I – коэффициент; для стали 45 – 1,2; для серого чугуна – 0,6; для деформируемых алюминиевых сплавов – 0,0026;

V – скорость резания, м/мин;

HV – твердость по Виккерсу изнашиваемой поверхности инструмента, МПа. Например, для ВК6М $HV = 13448$, $1 - 8,7 \times T_p$; для Т15К6 $HV = 16833,0 - 13,3 \times T_p$; для Р10М $HV = 17500 - 10 \times T_p$, где T_p – температура в зоне резания; в большинстве случаев при обработке черных металлов допустимо принимать $T_p = 800$ °С.

Определим расчетное время обработки на станке. Обработка детали на станке с ЧПУ, как правило, включает несколько операций. Применительно к осевым инструментам, это будет сверление, цековка, зенковка и т. д. Как правило, на загружаемой в станок детали обрабатывается несколько отверстий. Поэтому время и режимы обработки для каждой операций необходимо рассчитывать отдельно. Таким образом, для ключевого параметра – времени обработки детали можно записать:

Общее время обработки детали включает в себя: время установки и выверки заготовки; число отверстий умноженное на число видов поверхностей умноженное на (число поверхностей одного размера \times время обработки i -ой поверхности одного размера плюс время замены инструмента (отвод к позиции замены, замена)); время снятия детали со станка.

В свою очередь, обработка i -ой поверхности одного размера (цековки, фаски) для каждого отверстия детали на станке с ЧПУ требует времени, которое равно сумме следующих времен: время подвода инструмента по координатам; время подвода по нормали к детали на скорости быстрых перемещений; время подвода по нормали к детали на рабочей подаче; время резания; время вывода инструмента из детали на рабочей подаче; время отвода по нормали от детали на рабочей подаче; время отвода на безопасное расстояние на скорости быстрых перемещений.

Для времени обработки $T_{\text{ОТВ}}$ одной поверхности i -го отверстия можно записать:

$$T_{\text{ОТВ}} = 2 \cdot T_{\text{ПОД_ХХ}} + 2 \cdot T_{\text{ПОД_S}} + T_{\text{РЕЗ}} + T_{\text{ВЫВ}}, \quad (11)$$

где $T_{\text{ПОД_ХХ}}$ – время подвода инструмента вдоль оси обрабатываемой поверхности на длину ($\Delta_{\text{БЕЗ}} - \Delta_S$) на скорости быстрых перемещений станка $V_{\text{ХХ}}$;

$\Delta_{\text{БЕЗ}}$ – безопасное расстояние до поверхности заготовки при быстрых перемещениях инструмента;

Δ_S – расстояние подвода инструмента на рабочей подаче S ;

$T_{\text{ПОД_S}}$ – время подвода инструмента вдоль оси обрабатываемой поверхности на длину Δ_S на скорости рабочей подачи S ;

$T_{\text{ВЫВ}}$ – время вывода инструмента из отверстия на скорости рабочей подачи S ;

$T_{\text{РЕЗ}}$ – время обработки (резания) на скорости рабочей подачи S , которое определяется по формуле:

$$T_{\text{РЕЗ}} = \frac{L}{S},$$

$$S = f_Z \cdot Z \cdot n = f_Z \cdot Z \cdot \frac{V_{\text{РЕЗ}}}{\pi \cdot D}, \quad (12)$$

где L – длина обработки (глубина отверстия);

S – рабочая подача;

f_Z – подача на зуб;

Z – число режущих зубьев;

n – частота вращения осевого инструмента;

D – диаметр инструмента;

$V_{\text{РЕЗ}}$ – скорость резания.

Если принять, что все одинаковые поверхности (сверление, фаска и т. д.) поочередно обрабатываются одним инструментом, то время обработки всех i поверхностей одного размера будет равно:

$$T_{\text{ОТВ}_i} = T_{\text{ПОЗ}_i} + \sum_i \left(2 \cdot T_{\text{ПОД_ХХ}} + 2 \cdot T_{\text{ПОД_S}} + T_{\text{РЕЗ}} + T_{\text{ВЫВ}} \right)_k, \quad (13)$$

$$T_{\text{ПОЗ}_i} = \frac{X_i}{V_{\text{ХХ}}},$$

где $T_{\text{ПОЗ}}$ – время позиционирования (перемещения) инструмента на скорости $V_{\text{ХХ}}$ между отверстиями с одинаковыми обрабатываемыми поверхностями, расстояние между осями которых X_i .

$$T_{\text{ДЕТ}} = T_{\text{УСТ}} + T_{\text{СНТ}} + \sum_{N_{i_ОТВ}} \left(T_{i_РЕЗ} + T_{i_ОТВ} + T_{i_ПЕР} \right). \quad (14)$$

Обсуждение результатов.

Оценим составляющие времени обработки поверхностей одного размера на примере детали на рис. 1. Обработка детали заключается в сверлении 12 цековок $\varnothing 32 \times 10$; 12 отверстий $\varnothing 18 \times 30$ мм и фаски $2 \times 45^\circ$ на этих отверстиях; 12 отверстий $\varnothing 16 \times 50$ мм и фаски $1,6 \times 45^\circ$ на этих отверстиях. Всего необходимо 4 инструмента: два сверла $\varnothing 18$ и $\varnothing 16$, цековка $\varnothing 32 \times 10$, два фасочных сверла $\varnothing 22$ и $\varnothing 19$. Принимаем режимы резания $V = 120$ м/мин, $S = 0,25$ мм/об при обработке серого чугуна ($HB 180$, $K = 600$ Н/мм²) твердосплавным инструментом. Скорость быстрых перемещений $V_{\text{ХХ}} = 15$ м/мин, безопасное расстояние принимаем равным 50 мм от плоскости обработки, вне зависимости от реальной формы детали, длина подвода на рабочей подаче – 6 мм.

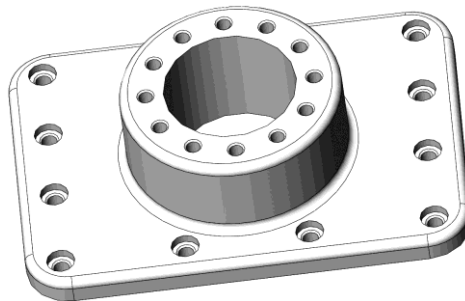


Рис. 1. Пример типовой детали при обработке осевым инструментом

Начнем с классического анализа – влияние скорости резания на производительность (число деталей в единицу времени). График суммарного времени резания (удаления материала) для всех пяти поверхностей как функция скорости резания представлены

на рис. 2, кривая 1. По мере повышения скорости резания с 50 до 200 м/мин расчетное время чистого резания всех поверхностей уменьшается с 5,2 мин до 1,3 мин.

Теперь учтем вспомогательные движения – подвод каждого инструмента по координатам отверстия на скорости быстрых перемещений, подвод по нормали к детали на скорости быстрых перемещений, перед врезание – на рабочей подаче, вывод инструмента из детали на рабочей подаче после окончания обработки, отвод по нормали от детали на рабочей подаче и далее на скорости быстрых перемещений на безопасное расстояние. Также учтем время установки и снятие детали со станка, приняв его равным 1,5 мин.

По мере повышения скорости резания с 50 до 200 м/мин расчетное время обработки всех поверхностей уменьшается с 12,85 мин до 8,9 мин (рис. 2, кривая 2). Иными словами, полное время обработки в 2,5–6,8 раза больше, чем время собственно резания, и чем выше скорость резания, тем эта разница больше.

Время резания (основное время) для различных видов обработки в 2,5–11 раз меньше, чем суммарное время обработки отверстия [2]. Особенно заметна эта особенность при обработке поверхностей с малым ходом инструмента – фасок, цековок.

Сократить время обработки позволяет использование комбинированного инструмента, сочетающего, например, сверло и фасочную или цековочную часть. Предполагается совпадение во времени сверления и выполнение цековки или фаски. Соответственно, отказ от вспомогательных перемещений инструмента для этих операций сокращает время обработки. Например, при повышении скорости резания с 50 до 200 м/мин расчетное время обработки всех поверхностей уменьшается с 8,9 до 5,8 мин или в 1,4–1,5 раза по сравнению с обработкой универсальным инструментом (рис. 2, кривая 3).

Если использовать станок с паллетной загрузкой (установка и снятие детали производится вне зоны обработки) и принять, что время смены паллет равно 15 секундам, то время обработки приближается ко времени чистого резания (рис. 2, кривая 4). В этом случае при повышении скорости резания с 50 до 200 м/мин расчетное время обработки всех поверхностей уменьшается с 6,4 до 3,3 мин или в 2,1–3,2 раза по сравнению с обработкой универсальным инструментом.

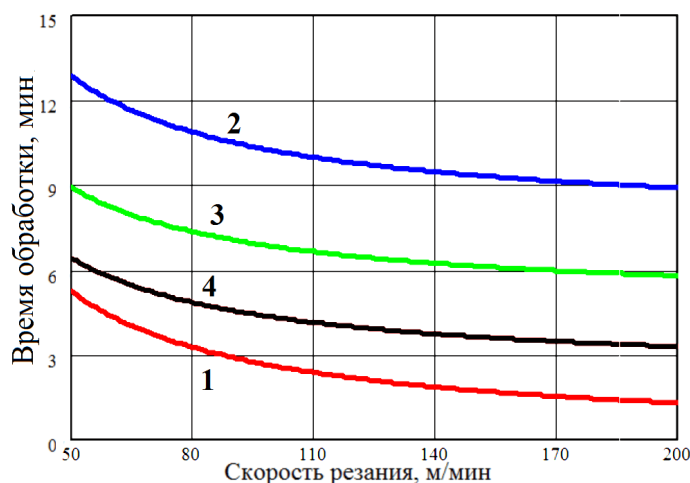


Рис. 2. Расчетное время обработки одной детали:
1 – время резания; 2 – время обработки универсальным инструментом; 3 – время обработки комбинированным инструментом; 4 – время обработки комбинированным инструментом с использованием паллет

Помимо инструментальных наладок, установленных на станок, необходим запас инструментов, как в магазине станка, так и оперативный, поскольку при автоматизирован-

ном производстве простой станков недопустим. Стоимость этих запасов тоже следует относить к себестоимости изготовления изделий. Оценим потребное количество инструментальных наладок, необходимых для бесперебойной работы станка в течение заданного времени, например, одной или трех смен (8 или 24 часа).

В зависимости от скорости резания каждый инструмент (или его часть, для комбинированного инструмента) может обработать определенное число деталей до замены. Принимаем, что смена инструмента происходит по одной из следующих причин:

- потребная мощность резания, крутящий момент, осевая сила равна или превосходит максимальное значение соответствующего параметра станка;
- износ инструмента равен или превосходит половину допуска на отверстие; принимаем величину допуска по h_{14} .

По результатам моделирования, причина замены – затупление инструмента, в результате чего крутящий момент и, соответственно, мощность резания возрастают более чем в два раза и начинают превышать предельно допустимые значения. Влияние скорости резания на число деталей, обработанных инструментом $\varnothing 32$ мм, $\varnothing 18$ мм, $\varnothing 16$ мм до замены показано на рис. 3. Исходя из времени работы инструментов $\varnothing 32$ мм, $\varnothing 18$ мм, $\varnothing 16$ мм, на рис. 4 показано число потребных наладок в расчете на работу в течение 8 и 24 часов.

Для упрощения перехода к экономическим критериям примем, что стоимость инструмента представляется как доля от стоимости станка, включая стоимость владения. Также, в качестве первого приближения, введем обобщенную вероятность отказа инструмента P ($P = 0 \dots 1$), пока без углубленного анализа факторов, влияющих на вероятность отказа (в первую очередь, подача, скорость резания, степень износа как силовой фактор, влияющий на напряженное состояние инструмента и знакопеременные напряжения в нем, вызывающие усталостные повреждения). Тогда развернутое выражение для оценки себестоимости изготовления детали примет вид:

$$C_{ДЕТ} = \frac{1}{N_{ДЕТ}} \cdot \left(C_{ЭКСПЛ} + \frac{C_{СТ} (1 + N_{ОПР} \cdot k_{СТ_ИН})}{525600 \cdot T_{ЭК_СТ}} \cdot k_{ФИН} \cdot 24 \cdot 60 \right) \cdot \frac{1}{(1 - P)},$$

$$N_{ДЕТ} = \frac{T_{СТ}}{T_{ДЕТ}}, \quad (15)$$

$$C_{ЭКСПЛ} = C_{ЗП} \cdot T_{РАБ} + C_{СТ} \cdot T_{СТ},$$

где $N_{ДЕТ}$ – число деталей, выпущенных за время работы станка $T_{СТ}$, шт.;

$T_{ДЕТ}$ – время изготовления детали, мин;

$C_{ЭКСПЛ}$ – стоимость одной минуты работы станка $C_{СТ}$ (без затрат на режущий инструмент и амортизацию), отработавшего время $T_{СТ}$ и стоимость одной минуты работы станочника $C_{ЗП}$, отработавшего время $T_{РАБ}$; при «безлюдной» работе $T_{СТ}$ и $T_{РАБ}$ не совпадают;

$N_{ОПР}$ – число наладок (инструмент + оправка), необходимых для бесперебойной работы станка за время $T_{СТ}$;

$k_{СТ_ИН}$ – коэффициент, равный отношению стоимости станка $C_{СТ}$ к стоимости установленного на него инструментов и оснастки;

P – обобщенная вероятность отказа любого вида при обработке осевым инструментом.

Для наглядности представления принято, что стоимость станка ($C_{СТ}$) составляет 400 000 у. е.; стоимость одной минуты работы станка ($C_{СТ}$) 0,08 у. е.; стоимость одной минуты работы станочника ($C_{ЗП}$) 0,08 у. е. (исходя из почасовой зарплаты и затрат на эксплуатацию по 5 у. е./час). Один комплект «инструмент + оснастка» стоит примерно

400 у. е. Время простоя из-за поломки или отсутствия дублирующего инструмента в магазине станка, равно как и стоимость брака по причине поломки или затупления инструмента не учитываем. Вероятность поломки инструмента принимаем равной нулю.

Результаты представлены на рис. 5, как график зависимости себестоимости изготовления детали от скорости резания универсальным и комбинированным инструментом при односменном (8 ч/сут) и трехсменном режиме работы (первая смена – в присутствии рабочих, вторая и третья – в «безлюдном» режиме). В табл. 1 приведены расчетные значения себестоимости при скорости резания 160 м/мин.

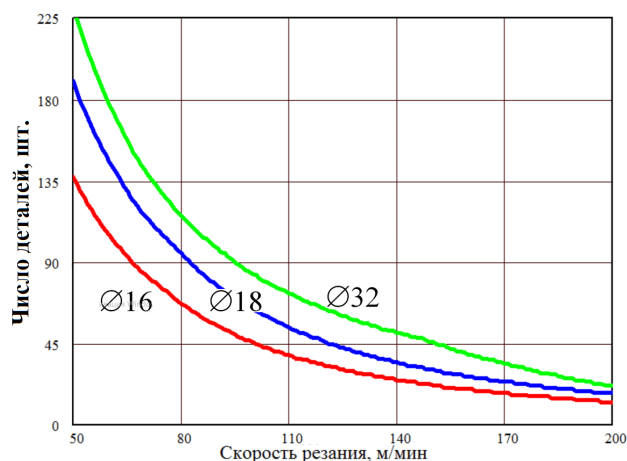


Рис. 3. Число деталей, обработанных инструментом разного диаметра, до замены

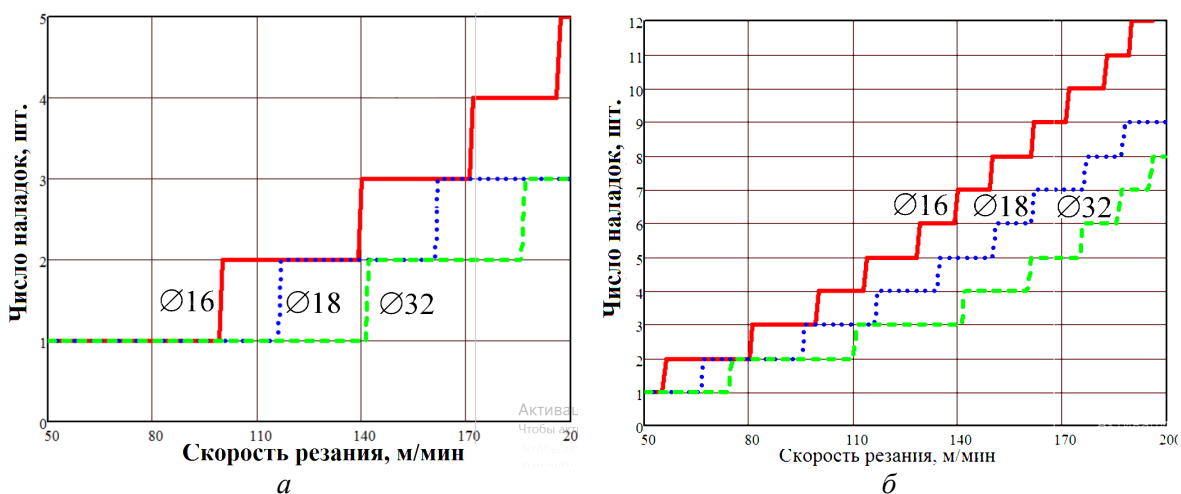


Рис. 4. Число наладок с инструментами разного диаметра как функция скорости резания: а – на 8 часов работы; б – на 24 часа работы

Таблица 1 – Себестоимость изготовления детали при различных условиях

Режим работы	Себестоимость, у. е.	Относительная себестоимость
Универсальный инструмент, односменная работа	7,62	1
Комбинированный инструмент, односменная работа	4,98	0,653
Универсальный инструмент, трехсменная работа	3,08	0,404
Комбинированный инструмент, трехсменная работа	2,00	0,263

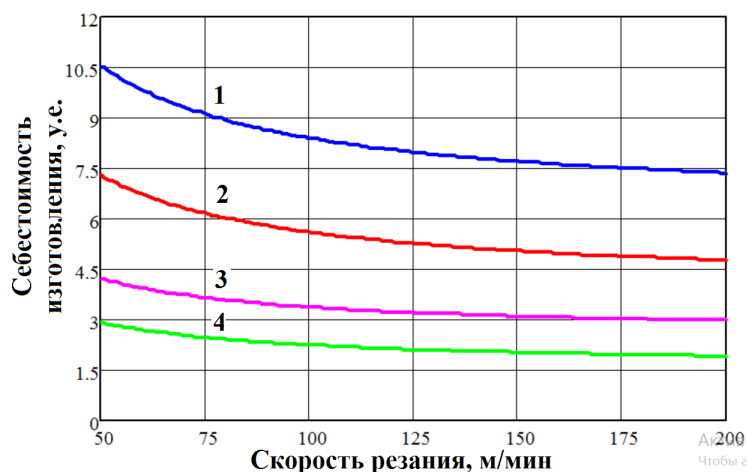


Рис. 5. Себестоимость изготовления детали при различных условиях как функция скорости резания:

- 1 – универсальный инструмент, односменная работа; 2 – комбинированный инструмент, односменная работа; 3 – универсальный инструмент, трехсменная работа; 4 – комбинированный инструмент, трехсменная работа

Заключение. Основное направление повышения реальной производительности и снижения себестоимости – повышения доли резания во времени обработки. Пути повышения: использование комбинированных инструментов, загрузка и выгрузка деталей со станка с использованием паллет.

Работа осуществлялась при финансовой поддержке БРФФИ в рамках договора на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методологии расчетов режимов резания в машиностроении (на примере обработки осевым инструментом)» № T22УЗБ-077.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ажар А. В., Колесников Л. А., Умаров Т., Яцкевич О. К. Крутящий момент при износе осевого инструмента // Сборник Международной конференции в Узбекистане 20–21 апреля 2023 года. – Ташкент, 2023. – С. 59–60
2. SECO. Обработка отверстий. Каталог + техническое руководство 2020.1. 03334951, ST20196722 RU, SECO TOOLS AB, 2020.
3. Михайлов, М. И. Прогнозирование работоспособности сборных сверл / М. И. Михайлов. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 241 с.
4. Грубый, С. В. Методика расчета выходных показателей точения / С. В. Грубый // Известия высших учебных заведений. Машиностроение № 9 (714). – 2019. – С. 26–34. doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-26-34
5. Ажар А. В., Колесников Л. А., Мухиддинов З. Н., Яцкевич О. К. Линеаризация связи ресурса и параметров резания для твердосплавного инструмента // Сборник Международной конференции в Узбекистане 20–21 апреля 2023 года. – Ташкент, 2023. – С. 42–43
6. Ажар А. В., Колесников Л. А., Мухиддинов З. И., Яцкевич О. К. Структура основного и вспомогательного времени при обработке осевым инструментом // БЕЛАРУСЬ-УЗБЕКИСТАН: формирование рынка инновационной продукции. Сборник материалов научно-практической конференции (Минск, 14–15 марта 2023 г.). – Минск : БНТУ, 2023. – С. 19–21
7. Ажар, А. В. Имитационное моделирование процесса обработки осевым инструментом / А. В. Ажар, Л. А. Колесников, З. И. Мухиддинов, О. К. Яцкевич // Тезисы докладов 37-ой междунауч. конф. «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Минск, 6 апреля 2023 г.) / редкол. В. К. Шелег [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2023. – С. 5–6.

Поступила 12.12.2023