

УДК 621.9

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

*д-р техн. наук, проф. Е.Э. ФЕЛЬДШТЕЙН
(Зеленогурский университет, Польша)*

Рассмотрены критерии, определяющие правильность выбора режущих инструментов, работающих в условиях гибких производственных систем (ГПС), и способы организации инструментального хозяйства. По мере совершенствования режущих инструментов и гибких производственных модулей, входящих в состав ГПС, основное время обработки будет иметь все меньшее значение, а возрастет влияние вспомогательного, подготовительно-заключительного времени и времени диагностики инструмента.

Правильный выбор условий обработки деталей в условиях ГПС может достаточно существенно повлиять на экономические показатели этой системы. Наиболее важно оптимизировать основное время обработки, время на определение и ввод коррекции в программу обработки и время на подготовку производства.

Исследуется влияние некоторых факторов обработки на ее экономические показатели и производительность. Приведены зависимости для расчета времени обработки и стоимости режущего инструмента, отнесенной к периоду его стойкости.

Введение. В современном машиностроении стоимость режущих инструментов составляет 2...4 % от общей стоимости производства детали [1, 2]. Однако их правильный выбор может оказывать опосредствованное влияние на целый ряд других экономических показателей [3, 4], в частности таких как:

- увеличение режимов резания, что повышает производительность и снижает себестоимость обработки;
- резание без использования СОЖ, что может снизить стоимость производства до 17 % [5];
- обработка деталей в закаленном состоянии, что весьма существенно упрощает технологический процесс обработки;
- резание в условиях HSC (от англ. *high speed cutting* – сверхскоростная обработка) [6];
- автоматическая диагностика и замена инструментов, позволяющие сократить обслуживающий персонал и работать круглосуточно;
- сокращение времени замены инструмента, т.е. непроизводительных простоев оборудования;
- увеличение периодов стойкости режущих инструментов, а значит, сокращение количества их замен и связанных с этим простоев оборудования;
- уменьшение рассеивания периодов стойкости режущих инструментов, влияющее на длительность безотказной работы оборудования, частоту замен инструментов и простои оборудования;
- использование более универсальных инструментов, что сокращает их общее количество и стоимость, а также может существенно повлиять на комплектование инструментальных магазинов – сокращается количество инструментов, не принимающих участие в обработке данной детали, но «ожидающих» участия в обработке других деталей;
- расширение технических ограничений процесса обработки (например, увеличение максимальной силы резания, жесткости оправки и т.д.);
- повышение качества обработанной поверхности, изменение условий ломания стружки и т.д.

Постановка задачи. Выбор инструментов для обработки конкретной детали основывается на технических, технологических и экономических критериях (таблица).

Кроме приведенных в таблице, могут использоваться и иные критерии выбора инструмента, например, традиции производства, стажировка работников на фирме – производителе инструмента, репутации этой фирмы и т.п.

На практике используются не все показатели, приведенные в таблице, а только некоторые из них, наиболее простые и доступные, преимущественно технические и технологические.

На рисунке 1 показаны составляющие общей стоимости операции при использовании режущих пластин из различных инструментальных материалов: 1) твердого сплава H20S (TT8K6) без покрытия; 2) особо мелкозернистого твердого сплава TN250 с покрытием и 3) режущей керамики AC5 [4].

Легко заметить, что решающую роль в стоимости обработки играют основное время и время коррекции параметров обработки при условии, что в этих действиях будет принимать участие рабочий. Остальные показатели имеют гораздо меньшее значение.

Критерии выбора режущих инструментов

Технические	Технологические	Экономические
1. Форма шпиндельного отверстия или гнезда револьверной головки. 2. Возможность автоматической смены инструмента (использования автооператора). 3. Способ идентификации (кодирования) инструмента. 4. Возможность обмена информацией между инструментом и системой управления ГПС (мониторинг). 5. Возможность ввода СОЖ непосредственно в зону резания через каналы в теле инструмента. 6. Возможность обработки всухую или в условиях минимального расхода СОЖ. 7. Возможность предварительной настройки инструмента на размер вне станка и его подналадки непосредственно на станке. 8. Высокая точность положения вершины инструмента при его замене, не требующая регулировки на размер или коррекции программы обработки. 9. Простота заточки лезвий или замены сменной пластины. 10. Диапазон стабильной работы, возможность гашения колебаний. 11. Возможность динамической балансировки. 12. Прочность и жесткость инструмента.	1. Возможность обработки данной формы поверхности (плоской, вращения, фасонной, резьбовой и т.п.). 2. Возможность обеспечения требуемого качества обработанной поверхности (шероховатости, волнистости, упрочнения и т.п.). 3. Возможность уменьшения рассеивания точности обработки и качества обработанной поверхности. 4. Соответствие свойств обрабатываемого и инструментального материалов. 5. Возможность использования СОЖ. 6. Высокие износостойкость и прочность инструмента. 7. Возможность дробления стружки в широком диапазоне режимов обработки. 8. Правильное сочетание формы режущих лезвий с условиями обработки, например, в условиях прерывистого резания, резания по корке, обработка труднодоступных мест и т.д.	1. Цена инструмента и стоимость его эксплуатации. 2. Условия договора о поставке инструмента между потребителем и производителем. 3. Необходимость использования существующего на ЦИСе запаса инструментов. 4. Требуемый период стойкости инструмента. 5. Рассеивание периодов стойкости, влияющее на время безотказной работы инструмента и выбор способа мониторинга его работы. 6. Возможность использования более жестких режимов обработки при сохранении необходимого качества обработанной поверхности. 7. Время замены изношенной вершины инструмента или инструмента в целом. 9. Наличие инструмента на ЦИСе или доступность на рынке.

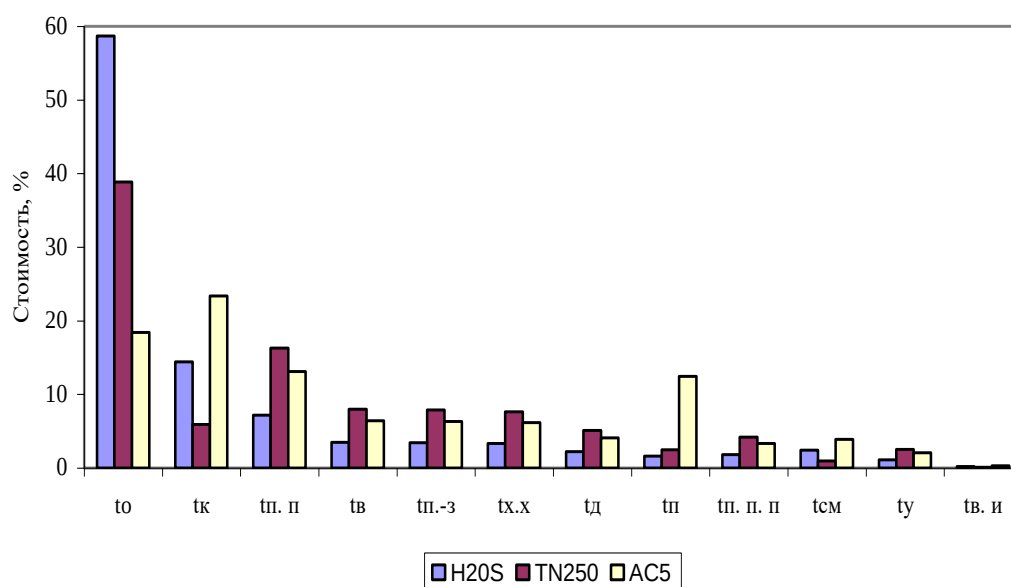


Рис. 1. Вклад различных показателей обработки в ее стоимость [4]:

(t_o – основное время; t_k – время на определение и ввод коррекции в программу обработки; $t_{п.п}$ – время на подготовку производства; t_v – вспомогательное время; $t_{п.-з}$ – подготовительно-заключительное время; $t_{x.x}$ – время холостых ходов; t_d – время диагностики состояния инструмента; $t_{п}$ – стоимость пластин; $t_{п.п.п}$ – время на повторную подготовку производства; $t_{см}$ – время смены инструмента; t_y – время функционирования системы управления; $t_{в.и}$ – стоимость вспомогательного инструмента)

Основная часть. По мере совершенствования режущих инструментов и гибких производственных модулей, входящих в состав ГПС, основное время обработки будет иметь все меньшее значение, а возрастет влияние вспомогательного, подготовительно-заключительного времени и времени диагностики инструмента.

В мировой практике существует три основных способа организации инструментального хозяйства:

- 1) этим занимаются соответствующие структуры внутри предприятия;
- 2) за эксплуатацию инструментов отвечает независимая фирма, гарантирующая оговоренный заранее вклад инструментов в общей стоимости продукции;
- 3) внутри предприятия существуют экономически независимые структуры, связанные с эксплуатацией инструментов.

В практике промышленных предприятий стран СНГ фактически используется только первая из систем. В этом случае основной целью является снижение стоимости производства, причем возможны два способа ее определения:

1) определяется стоимость S_i каждой (i -той) операции, и для этой операции подбираются режущие инструменты. Целью выбора может быть либо снижение стоимости при сохранении производительности обработки, либо увеличение производительности до определенного уровня (например, при «расшивке» узких мест);

2) определяется стоимость продукции для ГПС в целом, с учетом поточного производства и такта выпуска.

В первом случае для расчета средней стоимости i -той операции при обработке партии деталей может быть использована формула:

$$S_i = \frac{S_{c-mi} + \lambda_i S_{ol} t_{ui}}{60} + \sum_{j=1}^n \frac{S_{ji}}{N_{ji}}, \quad (1)$$

где S_{c-m} – стоимость станко-минуты работы гибкого производственного модуля, учитывающая амортизационные отчисления, стоимость энергии, обогрева, ремонтов и др.; S_o – часовая ставка зарплаты оператора; λ – коэффициент, учитывающий многостаночное обслуживание; t_{ui} – штучное время; S_j – стоимость j -того режущего инструмента, отнесенная к периоду его стойкости; N_j – количество деталей, обработанных j -тым инструментом за период его стойкости; n – количество инструментов, участвующих в i -той операции.

Штучное время обработки на i -той операции:

$$t_{ui} = \frac{t_{n-3}}{N} + \left(\sum_{j=1}^n t_o + \sum_{j=1}^n t_s + \frac{\sum_{j=1}^n (t_{cm} + t_k)}{N_j} \right) (1 + k_o), \quad (2)$$

где t_{n-3} – подготовительно-заключительное время; N – количество деталей в партии; t_o – основное время работы j -тым инструментом; t_s – вспомогательное время работы j -тым инструментом; t_{cm} – время смены j -того инструмента; t_k – время коррекции программы для j -того инструмента; k_o – коэффициент, учитывающий дополнительное время.

Стоимость S_j работы j -того режущего инструмента, отнесенная к периоду его стойкости:

$$S_j = \frac{S_u}{m} + S_{зат} + S_{покp}, \text{ или } S_j = \frac{S_{опp}}{m_{снп}} + \frac{S_{снп}}{m_в} m_j, \quad (3)$$

где S_u – стоимость перетачиваемого инструмента; m – количество возможных переточек; $S_{зат}$ – стоимость заточки; $S_{покp}$ – стоимость нанесения покрытия; $S_{опp}$ – стоимость оправки (корпуса) инструмента; $m_{снп}$ – количество сменных неперетачиваемых пластин, которое может выдержать оправка до повреждения; $S_{снп}$ – стоимость сменной неперетачиваемой пластины; $m_в$ – число вершин пластины; m_j – количество пластин в режущем инструменте.

Количество деталей, обработанных j -тым инструментом за период его стойкости:

$$N_j = \frac{T}{t_o} = \frac{L_{p.xj}}{S n_j} = \frac{\pi D L_{p.xj}}{1000 S v}, \quad (4)$$

где T – период стойкости j -того инструмента; $L_{p.x}$ – длина рабочего хода инструмента; S – подача; n – частота вращения шпинделя; D – диаметр обрабатываемой поверхности или инструмента; v – скорость резания.

С экономической точки зрения наилучший инструмент обеспечивает минимальное значение S_j . При этом возможны несколько сочетаний стоимости сравниваемых инструментов (1) и (2) и периодов их стойкости:

1) $S_{j1} \geq S_{j2}; T_1 < T_2$ – не имеет практического значения, поскольку нет смысла использовать более дорогой и менее работоспособный инструмент;

2) $S_{j1} < S_{j2}; T_1 > T_2$ – наиболее благоприятное сочетание;

3) $S_{j1} > S_{j2}; T_1 > T_2$ – более дорогой, но и более работоспособный инструмент. Такое сочетание целесообразно, если:

- при постоянстве режима резания период стойкости более дорогого инструмента будет достаточно высок, чтобы сокращение времени смены инструмента, отнесенное к одной детали, было бы достаточно велико, чтобы повлиять на производительность обработки;

- при постоянной стойкости можно увеличить режим резания и тем самым уменьшить основное время обработки, увеличить производительность и снизить стоимость обработки;

- имеет место комбинация двух данных вариантов, т.е. одновременное увеличение стойкости инструмента и режима обработки;

4) $S_{j1} < S_{j2}; T_1 < T_2$ – возможно при условии, что меньший период стойкости не увеличит существенно частоту смены инструмента и, соответственно, производительность обработки.

При определении стоимости продукции для ГПС в целом можно воспользоваться уравнением:

$$S_{\Sigma} = \left(\sum_{i=1}^x \frac{S_{c-mi}}{60} + \sum_{i=1}^x \frac{S_{oi}}{60} \right) \bar{t}_m + \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^n \frac{S_{ij}}{N_{ij}}, \quad (5)$$

где S_{c-mi} – стоимость станко-минуты работы i -того гибкого производственного модуля; S_{oi} – часовая ставка зарплаты оператора при работе на i -том гибком модуле; $\bar{t}_m$ – средний такт выпуска; S_{ij} – стоимость j -того режущего инструмента, отнесенная к периоду его стойкости при работе на i -том гибком модуле; N_{ij} – количество деталей, обработанных j -тым инструментом за период его стойкости при работе на i -том гибком модуле; n – количество инструментов, работающих в i -том гибком модуле; x – количество гибких производственных модулей в данной ГПС.

Средний такт выпуска при работе ГПС учитывает наличие в ней промежуточных накопителей, разное время работы различных производственных модулей и может быть определен по формуле:

$$\bar{t}_m = \left(1 + \frac{x + \sum_{i=1}^x N_n - 1}{N} \right) t_{m \max} + \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^n \frac{t_{cm} - t'_{cm}}{N_j} + \frac{\sum_{i=1}^x t_n}{N}, \quad (6)$$

где N_n – количество деталей в i -том промежуточном накопителе; $t_{m \max}$ – максимальный такт выпуска; t'_{cm} – неперекрываемое время смены инструментов за период $(t_{m \max} - t_o)$ работы гибкого модуля; t_n – время перерывов в работе ГПС.

Максимальный такт выпуска равен максимальному времени обработки на всех рабочих местах ГПС, т.е.

$$t_{m \max} = \max_{i \in x} \left[\sum_{j=1}^n (t_{oj} - t'_{oj} + t_{ej} - t'_{ej}) \right], \quad (7)$$

где t'_{oj} , t'_{ej} – основное и вспомогательное неперекрываемое время.

Для упрощения расчетов при определении стоимости продукции для ГПС в целом можно воспользоваться уравнением:

$$S_{\Sigma} = \frac{\left(\sum_{i=1}^x \frac{S_{c-mi}}{60} + \sum_{i=1}^x \frac{S_{oi}}{60} \right) \bar{t}_m}{x} \left\{ \max_{i \in x} \left[\sum_{j=1}^n (t_{oj} - t'_{oj} + t_{ej} - t'_{ej}) \right] + \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^n \frac{t_{cm} - t'_{cm}}{N_j} + \frac{\sum_{i=1}^x t_n}{x} \right\} + \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^n \frac{S_{ij}}{N_{ij}}. \quad (8)$$

Первый член этого уравнения рассчитывает среднюю стоимость продукции на рабочем месте ГПС, второй – учитывает неравномерность загрузки рабочих мест, а третий – стоимость режущих инструментов.

Основным критерием при выборе режущего инструмента для работы в условиях ГПС является ответ на следующий вопрос: что выгоднее – использовать дорогой инструмент высокой стойкости или более дешевый, но меньшей стойкости? При решении данного вопроса принимаются во внимание стоимость инструмента, стоимость производства детали и взаимное отношение этих величин.

Рассмотрим влияние некоторых факторов обработки на ее экономические показатели и производительность. Если обработка выполняется при постоянных условиях, а изменяется только стойкость инструмента (инструмент другой фирмы, с иной геометрией и т.п.), то стоимость обработки изменяется согласно зависимостям, представленным на рисунке 2. Если обработка каждым инструментом выполняется на оптимальной скорости резания, то последняя возрастает по мере роста стойкости (но не более чем на 3...4 %), что снижает стоимость обработки на 1...2 %.

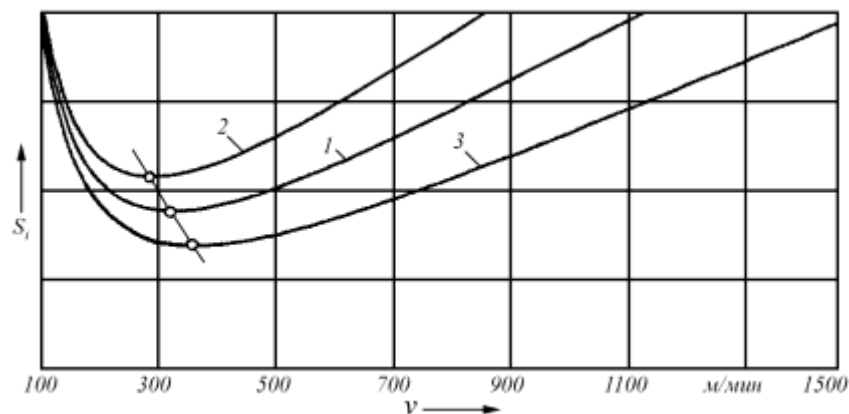


Рис. 2. Влияние периода стойкости инструмента на стоимость обработки детали:
1 – $T = 100\%$; 2 – $T = 50\%$; 3 – $T = 500\%$

Приведенные зависимости характерны для использования перетачиваемых режущих инструментов и инструментов сборных конструкций. В последнем случае, однако, решающую роль играет стоимость сменной пластины (возрастание стоимости в 4 раза увеличивает стоимость обработки на 8...9 % [4]), тогда как стоимость державок, корпусов и т.п., разложенная на десятки и сотни периодов стойкости, практического влияния не оказывает.

При анализе эффективности обработки важно увязать стоимость инструмента с его эксплуатационными возможностями. Часто более дорогой инструмент одновременно имеет и более высокие оптимальные скорости резания. Если этого не учитывать, можно принять ошибочное решение о выборе инструмента (рис. 3). Так, инструмент 2 при работе со скоростью резания v_1 , характерной для инструмента 1, оказывается непригодным, а при работе на оптимальной скорости v_2 – обеспечивает снижение стоимости обработки.

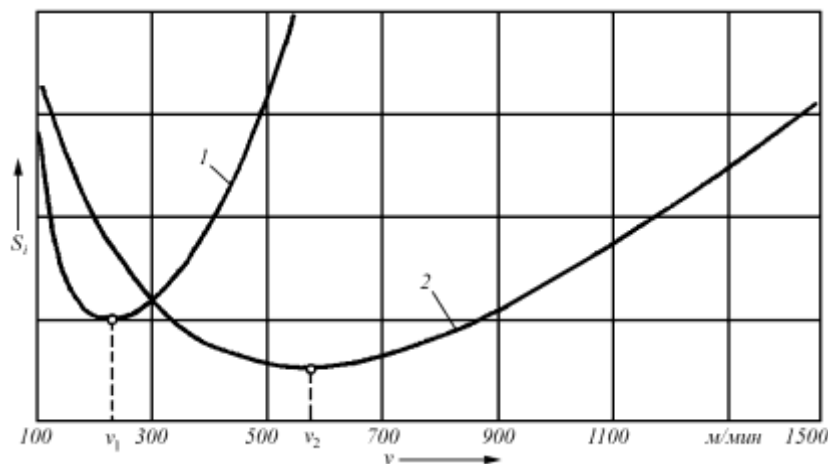


Рис. 3. Влияние стоимости и качества инструмента на стоимость операции

Выше было показано, что значительная доля общей стоимости обработки детали приходится на время t_k , связанное с корректировкой условий обработки (см. рис. 1). Такие действия необходимы при замене инструмента или сменной пластины, когда изменяется положение вершины инструмента и необходимо вносить поправки в программу обработки. Влияние времени t_k на стоимость обработки детали представлено на рисунке 4. Здесь кривая 1 соответствует случаю $t_k = 0$, когда все поправки определяются заранее, вне станка; кривая 2 – случаю $t_k = 2$ мин, когда часть инструментов настраивается заранее вне станка, а для определения положения вершины остальных непосредственно на станке используются измерительные зонды; кривые 3, 4 – случаям $t_k = 10$ и 20 мин, когда для определения корректив необходимо выполнять дополнительные пробные проходы.

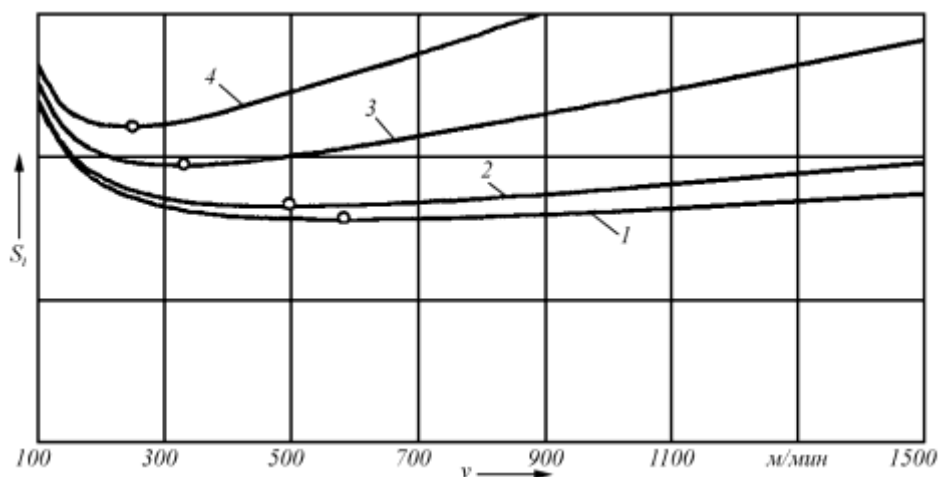


Рис. 4. Влияние времени определения и ввода корректив на стоимость операции

На основании зависимостей (см. рис. 4) автором работы [4] разработана номограмма для определения возможности использования более дорогих, но не требующих коррекции режущих инструментов (рис. 5). Принимая за базовое время $t_k = 10$ мин, можно установить, что при времени $t_k = 5$ мин инструмент может быть дороже в 2,5 раза, а при $t_k = 0$ мин – в 4 раза.

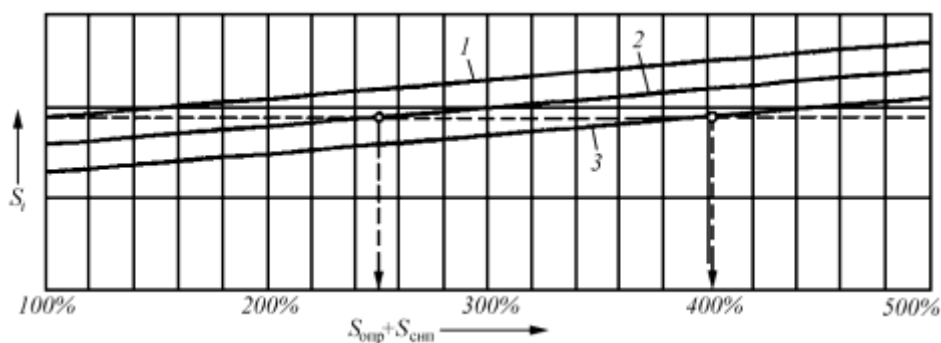


Рис. 5. Взаимосвязи между временем коррекции условий обработки и стоимостью режущего инструмента

При анализе условий работы инструмента часто рассматриваются вопросы смены инструмента. Здесь существуют следующие возможности:

1) производится замена целого инструментального блока (режущий инструмент + шпиндельная оправка). Замена осуществляется, когда инструментальный блок находится в магазине производственного фрезерно-расточного модуля, причем это действие относится сразу к большой группе инструментов. Взамен изношенных блоков в гнезда магазина устанавливают новые инструменты, уже настроенные на размер и не требующие коррекции. В этом случае влияние времени смены инструмента на стоимость операции имеет маргинальный характер;

2) производится поворот или замена пластины в оправке режущего инструмента, установленного в револьверной головке токарного производственного модуля. В зависимости от конструкции узла креп-

ления пластины время замены может изменяться в достаточно широких пределах, а с целью его сокращения можно использовать более дорогой инструмент (рис. 6). Следует отметить, что стоимость обработки при этом изменяется незначительно, однако оператор имеет больше свободного времени для выполнения каких-либо дополнительных функций (контроль деталей, многостаночное обслуживание и т.п.).

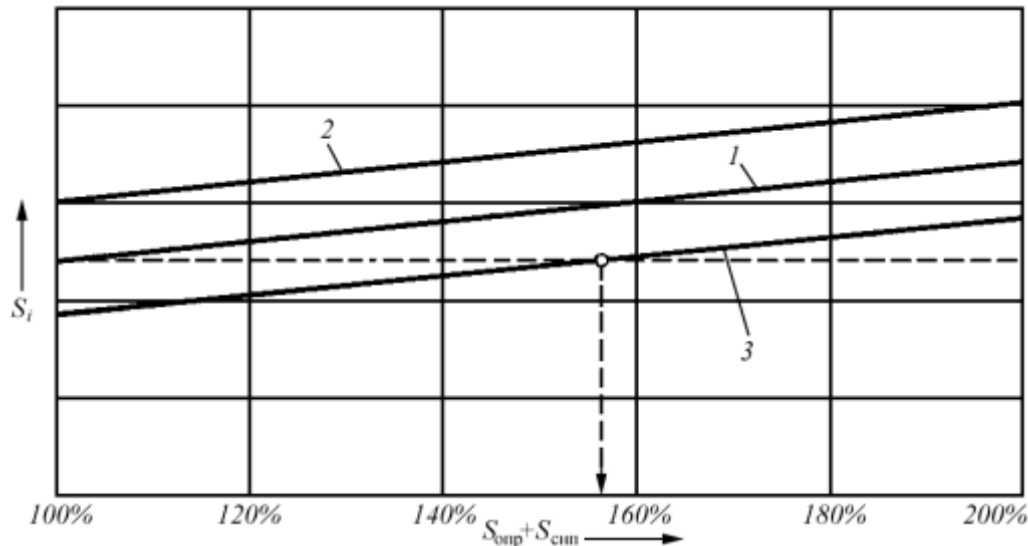


Рис. 6. Взаимосвязи между временем смены инструмента и его стоимостью:
1 – $t_{см}$; 2 – $2t_{см}$; 3 – $0,05t_{см}$

Закключение. Правильный выбор условий обработки деталей в условиях ГПС может достаточно существенно повлиять на экономические показатели этой системы. Наиболее важно оптимизировать основное время обработки, время на определение и ввод коррекции в программу обработки и время на подготовку производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фельдштейн, Е.Э. Обработки деталей на станках с ЧПУ / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е изд. – Минск: Новое знание, 2006. – 287 с.
2. Cichosz, P. Structural analysis of manufacturing costs involved in applying numerically controlled lathes / P. Cichosz, H. Żebrowski // Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń PAN. – 1998. – Vol. 22. – № 4. – S. 35 – 47.
3. Cichosz, P. Tool quality and economic effectiveness of turning / P. Cichosz, M. Kuzinovski, H. Żebrowski // Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń PAN. – 1998. – Vol. 22. – № 4. – S. 49 – 57.
4. Cichorz, P. Ekonomiczne aspekty doboru narzędzi skrawających do zadania produkcyjnego / P. Cichorz // Mechanik. – 2004. – № 2. – S. 642 – 647.
5. Byrnel, G. Advancing Cutting Technology / G. Byrnel, D. Dornfeld, B. Denkena // Annals of CIRP. – 2003. – V. 52. – № 2. – P. 483 – 509.
6. Ящерицын, П.И. Теория резания / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2 изд. испр. и доп. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.

Поступила 11.06.2007