

В.А. Залога, д-р техн. наук, Д.В. Криворучко, канд. техн. наук,
Н.П. Кутовой, Сумы, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ КАК ОДИН ИЗ СПОСОБОВ ЭКСПРЕСС ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

На сучасному ринку представлена величезна кількість різальних інструмент для різних операцій обробки різанням. Тому питання про вибір найбільш ефективного інструмента виникає дуже часто. У сучасних умовах моделювання робочого процесу різання обраним інструментом є доброю альтернативою виробничим випробуванням. У статті представлені два приклади застосування моделювання для оцінки якості стружкоутворення та вибору найбільш ефективного інструменту з змінними пластинами при нарізуванні глибоких канавок і різьбонарізуванні. Ці приклади демонструють можливість зниження витрат на порівняння інструментів різних виробників.

На современном рынке представлено огромное количество режущих инструментов для различных операций обработки резанием. Поэтому вопрос о выборе наиболее эффективного инструмента возникает очень часто. В современных условиях моделирование рабочего процесса резания выбранным инструментом является хорошей альтернативой производственным испытаниям. В статье представлены два примера применения моделирования для оценки качества стружкообразования и выбора наиболее эффективного инструмента со сменным непереключаемыми пластинами при нарезании глубоких канавок и резьбонарезании. Эти примеры демонстрируют возможность снижения затрат на сравнение инструментов различных производителей.

Today there are a lot of tool manufacturers which propose wide range of tools for machining operations. How to make a right choice in such situation? The simulation of the machining operation with proposed tools is a modern alternative to production tests. In this article two examples of application of machining simulation technology for quality estimation of chip formed during grooving and threading operations with inserted tools and selection of the most efficient cutting inserts are described. These examples show how machining simulation allows reducing charges for comparison of tools from various manufacturers.

Введение

Бурное развитие машиностроения создало основу для развития инструментальной промышленности. В настоящее время десятки фирм - производителей инструментов - создали и предлагают потребителю режущие инструменты различных конструкций, форм и размеров практически для любой области применения. Несмотря на столь сильную конкурентную борьбу, стоимость режущего инструмента остается весьма значительной, особенно для импортируемого инструмента. В этой ситуации потребители – машиностроительные предприятия, - которые считают необходимым внедрять современный режущий инструмент в свое производство, должны

каждый раз делать выбор по конкретным конструкциям режущего инструмента из многих предложений фирм-производителей.

Наилучшей основой для выбора режущего инструмента, наиболее эффективного для данных условий, являются данные о его ресурсе, качестве стружкодробления, силе резания и другие данные, полученные из производственных испытаний этого режущего инструмента. Однако высокая стоимость и значительный (1-3 месяца) срок поставки конкретного режущего инструмента в условиях рынка Украина, а также значительные временные и материальные затраты на проведение производственных испытаний, не позволяют оперативно получить необходимые данные, выполнить сравнение и принять решение о выборе наиболее эффективного режущего инструмента.

Одним из перспективных направлений в решении этой проблемы является, по нашему мнению, применение технологии имитационного моделирования рабочих процессов резания. Значительные успехи в этой области, достигнутых наукой о резании материалов в последние годы (см., например, [1]), позволяют реализовать технологию виртуальной проверки работоспособности инструментов путем имитационного моделирования рабочего процесса без проведения каких-либо натурных экспериментов непосредственно по резанию этими инструментами. В результате выполненных расчетов может быть получена информация о силе резания, температуре резания, форме стружки и другие показатели процесса, которые могут быть использованы для оценки эффективности инструмента в конкретных условиях. Поэтому целью настоящей работы является демонстрация возможности применения имитационного моделирования процессов резания методом конечных элементов для оценки качества стружкообразования при резании инструментами с геометрически сложной передней поверхностью и сокращения затрат на производственные испытания инструментов различных производителей.

Для этого в статье рассмотрен пример исследования канавочных (отрезных) и резьбонарезных резцов с механическим креплением сменных неперетачиваемых пластин различных производителей при обработке конструкционной стали. С точки зрения работоспособности и эффективности этих инструментов форма и размеры стружки играют первостепенную роль, поскольку качество и надежность удаления стружки из зоны резания определяет надежность работы режущего инструмента в целом, его ресурс и качество обработанных поверхностей.

Для процесса точения радиальных канавок, особенно с глубиной $10b$ и более (b - ширина среза) или отрезания наиболее опасным является пакетирование стружки в формирующейся канавке, приводящее к существенному и, как правило, непредсказуемому увеличению силы резания и, следовательно, к непредсказуемой поломке режущей кромки канавочной пластины или всего резца в целом.

Процесс точения резьбы является процессом несвободного резания, поскольку в работе участвуют две режущие кромки (резьбы с треугольным профилем, например, метрические) и более режущих кромок (например, для трапециевидных резьб - три). «Столкновение» встречных потоков стружки, перемещающихся одновременно со стороны каждой кромки, приводят к дополнительной деформации стружки и увеличению работы сил резания, что способствует повышению температуры резания, снижению ресурса режущего инструмента, а также непредсказуемому изменению силы резания, и, следовательно, случайной поломке пластины, что часто имеет место особенно при обработке нежестких деталей.

Управление формой и размерами стружки может быть реализовано путем изменения коэффициента трения выбором инструментального материала и покрытия, введением в зону резания дополнительных источников энергии, например, вибраций, подбором режима резания и другими способами. Одним из наиболее эффективных способов является создание на передней поверхности режущего инструмента специальных элементов (выступов или впадин определенной формы), способствующих приданию стружке необходимой формы для ее эффективного отвода из зоны резания и дробления. Практически все современные режущие пластины снабжены такими элементами, однако, эффективность их работы в каждом конкретном случае (в зависимости от условий обработки, свойств обрабатываемого материала и др.) разная. Именно этим во многом и определяется эффективность всего инструмента в конкретных производственных условиях.

Исходные данные для имитационного моделирования

В данном исследовании изучался процесс стружкообразования при точении стали 45 (HB180). Точение канавок изучалось для случая обработки канавки шириной 4 мм и глубиной 0.16мм (врезание) и 40 мм резцами с пластинами: ГОСТ 17163-90 13532, ISCAR TAG N4J, WIDIA M4 1235 67 440, круглая R4 1235 67 605, Sandvik N 151.2-400-40-45, Kennametal A4CO405L06CF02, TaeguTec TDJ4. Режим резания для всех инструментов был выбран одинаковым: $S=0,16\text{мм/об}$, $V=300\text{ м/мин}$. Этот режим резания входит в область рекомендуемых режимов резания всех рассмотренных канавочных пластин.

Точение резьбы изучалось на завершающей стадии обработки резьбы M100x4 резцами с пластинами: ГОСТ 22398-82 11150, MITSUBISI MMT22ERN60, TaeguTec 22ERN60, Kennametal LT22ERNISOCB, Sandvik R166.0G-22VMO1-400, R166.0G-22VMO1C400, LMT B22ER4.0ISO. Режим резания для всех инструментов был выбран одинаковым: $t_1=0,05\text{ мм}$, $V=300\text{ м/мин}$. Этот режим резания входит в область рекомендуемых режимов резания для всех рассмотренных резьбовых пластин. Угол подкладной

пластины резбьбовых резцов был выбран по рекомендациям соответствующих каталогов.

Геометрия режущих пластин была восстановлена по данным каталогов [2, 3, 4, 5, 6, 7] справочника [8, 9]. Для того, чтобы выделить эффект, получаемый только от стружколомающих элементов на режущих пластинах, были приняты: материал всех пластин ВК8 и средний коэффициент трения на контактной границе «стружка-лезвие» 0,28. Пластина считалась абсолютно жесткой.

Исследования путем имитационного моделирования производились по методике, описанной в работе [10]. Расчеты выполнялись методом конечных элементов в среде LS-DYNA. Геометрическая модель была ограничена теми частями режущей пластины и державки, которые потенциально могут контактировать со стружкой и заготовкой в процессе резания. Ориентация контактных поверхностей пластины выполнена с учетом углов ее установки в державку. Длина заготовки составляла 40 мм. Диаметр заготовки считался значительно больше ширины паза. Общее количество конечных элементов в каждой модели составляло от 50000 до 98000 элементов в зависимости от геометрической сложности пластины. Решение выполнялось явным методом с допущением об абсолютной жесткости технологической системы и адиабатичности процесса деформирования. Разрушение моделировалось удалением конечных элементов, в которых достигалось предельное значение накопленной поврежденности по В.Л. Колмогорову. Определяющее уравнение и уравнение пластичности для стали 45 были использованы из работ S. Jaspers [11] и В.Л.Колмогорова [12] соответственно.

Общее машинное время вычислений всех вариантов составило около 960 часов, среднее время вычислений одного варианта – 60 часов на ЭВМ с процессором Intel Xeon 5405 2,00 ГГц с использованием 2 ядер на 1 задачу. Суммарное календарное время проведения всех вычислений в рамках данного исследования составило около 240 часов или 10 суток непрерывной работы ЭВМ.

Результаты исследований и их анализ

Сначала рассмотрим результаты исследований процесса точения канавок (отрезания) (табл. 1). Расчеты показали, что каждая пластина формирует стружку, отличающуюся от стружек, образующихся при работе других пластин. Наличие впадин и выступов на передней поверхности пластин способствует ее завиванию, что видно при сравнении видов стружек при резании разными пластинами: пластины №2,4,5,7 характеризуются образованием стружки с относительно меньшим радиусом кривизны, чем при резании пластинами №1,3,6. (сравните стружку пластины №1 со стружками других пластин). Меньший радиус кривизны стружки способствует более плотной упаковке стружки. Поэтому пластины №2,4,5,7 с этой точки зрения имеют преимущество. Вместе с тем, с точки зрения безопасности труда, особенно пластины №1 и №3, являются наименее предпочтительными.

Надежность удаления стружки при точении канавки (отрезании) существенным образом зависит и от ее ширины. С этой точки зрения пластина №1 не может использоваться для точения глубоких канавок, поскольку ширина ее стружки примерно на 0,1-0,2 мм больше ширины канавки см., рис., и при точении глубокой канавки дополнительно деформируется по ширине стенками канавки (табл. 1). Это способствует повышенному тепловыделению и силе резания, а также увеличивает вероятность пакетирования стружки. Все прочие пластины обеспечивают формирование стружки по крайней мере на 0,01 мм уже, чем ширина обрабатываемой канавки. Пластины № 4 и №7 не дают существенного сужения стружки. Пластины № 2 и №5 обеспечивают сужение стружки на 0,11-0,5 мм по сравнению с шириной формируемого паза. Круглые пластины № 3 и №6 обеспечивают, наименьшую ширину стружки с толщиной более 0,04 мм (толщина конечного элемента в основной части стружки). Вместе с тем, полученные расчетные данные не позволили установить фактические границы стружки из-за того, что ее толщина для круглых пластин неограниченно уменьшается при приближении к стенкам паза и становится менее толщины принятого конечного элемента. Таким образом, с точки зрения ширины образующейся стружки (меньше ширины паза) пластины №2, №3, №5, №6, №7 имеют преимущество.

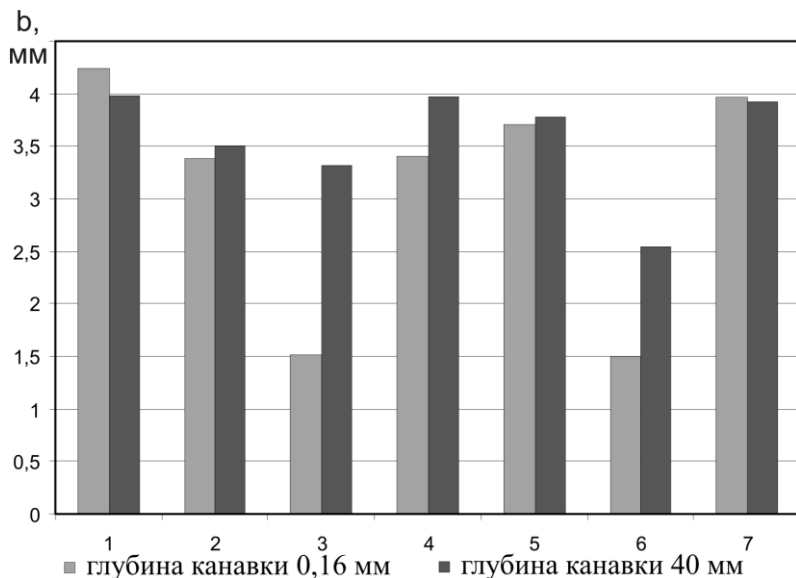
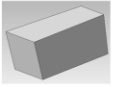


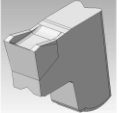
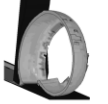

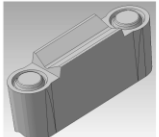

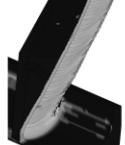
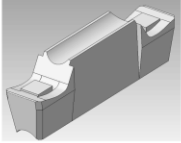

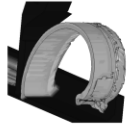
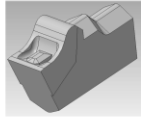

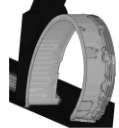
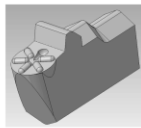

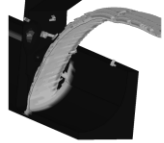
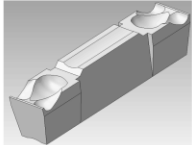
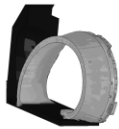
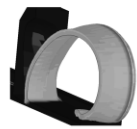


Рисунок – Ширина стружки при точении различными канавочными пластинами

Таблица 1 – Форма стружки при точении канавок различными пластинами

Пластина	Геометрическая модель пластины	Форма стружки при врезании *	Форма стружки при точении канавок глубиной 40 мм *
1. ГОСТ 17163-90 Код 13532			
2. ISCAR Код TAG N4J			
3. Sandvik Код N 151.2-400-40-45			
4. Kennametal Код A4C0405L06CF02			
5. WIDIA Код M4 1235 67 440			
6. WIDIA Код R4 1235 67 605			
7. TaeguTec Код TDJ4			

Примечание: *Показано половина стружки, отделенная плоскостью симметрии, незначительные элементы заготовки условно не показаны

Для комплексного сравнения канавочных пластин с точки зрения эффективности стружкообразования предложена система критериев (табл. 2), которая отражает необходимые требования к условиям реализации процесса резания. По критериям *a-z* оценка производилась по 3-х бальной шкале, по критерию *d* – по 2-х бальной. Баллы по критерию *a* назначались исходя из формы стружки: плоская - 0 баллов, так как она не способствует сужению стружки и плотной ее упаковке; вогнутая - 1 балл, так как она способствует сужению стружки и лишь в некоторой степени ее; выпуклая – 2 балла, так как она способствует и сужению стружки и ее упаковке. Баллы по критерию *b* назначались по величине радиуса кривизны стружки: чем меньше радиус кривизны, тем лучше упаковка стружки (без пакетирования) и вероятность ее поломки и, следовательно, больше балл. Баллы по критерию *в* назначались по ширине стружки: чем меньше ширина стружки, тем меньше вероятность пакетирования стружки и, следовательно, больше балл. Баллы по критерию *г* назначались по величине силы резания: чем меньше сила резания, тем легче, при прочих равных условиях, происходит процесс формирования стружки и, следовательно, больше балл. Наконец, при рассмотрении критерия *d* учитывалось то, что постоянна ширина среза по длине режущей кромки обеспечивает более благоприятные условия стружкообразования и, следовательно, больше балл.

Анализ таблицы 2 показывает, что для рассмотренных условий наиболее эффективными является пластина №2 (TAG N4J), набравшая 7 баллов из 9 возможных. На втором месте оказались пластины №4 (A4CO405L06CF02), №5 (M4 1235 67 440) и №7 (TDJ4) главным образом из-за того, что они недостаточно способствуют сужению стружки и реализуют большую силу резания. Круглые пластины №3 (N 151.2-400-40-45) и №6 (R4 1235 67 605) набрали всего 3 балла и оказались на третьем месте за счет того, что при их использовании имеет место как наибольшая из всех пластин сила резания, так и неблагоприятные условия работы режущей кромки из-за переменной толщины среза. На последнем месте оказалась пластина №1 (13532). Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что в рассмотренных условиях наиболее эффективное стружкообразование обеспечивают пластины №2 (TAG N4J) - первое место; №4 (A4CO405L06CF02), №5 (M4 1235 67 440) и №7 (TDJ4) – второе место. Эти пластины могут быть рекомендованы для производственных испытаний.

Далее рассмотрим стружкообразование при точении резьбы. Проведенные расчеты позволили определить форму и размеры стружек, которые формируются при использовании исследуемых резьбовых пластин (табл. 3). Анализ показывает, что наличие выступов и впадин на передней поверхности лезвий способствует разделению потоков стружки от работающих режущих кромок, стружкозавиванию и/или ломанию стружки. Пластины № 1 и № 2 формируют сильно завитую стружку, формирующуюся в результате столкновения двух потоков. Однако эти пластины обеспечивают практически минимальную силу резания.

Таблица 2 - Сравнение канавочных пластин по эффективности стружкообразования

Характеристика	Пластина						
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Обозначение	13532	TAG N4J	N 151.2 400-40-45	A4CO405 L06CF02	M4 1235 67 440	R4 1235 67 605	TDJ4
Производитель	ГОСТ 1716390	ISCAR	SANDVIK	Kenam- etal	WIDIA	WIDIA	TaeguTec
а) Форма стружки в поперечном сечении	Плоская/ 0	Выпухла/ 2	Плоская/ 1	Вогнутая/ 1	Выпухлая/ 2	Плоская/ 0	Вогнутая/ 1
б) Радиус кривизны стружки, мм	26/ 0	5,4/ 1	43/ 0	5,5 / 1	5,8/ 1	10,9/ 1	5,87/ 1
в) Ширина стружки, мм	4,0/ 0	3,5/ 1	3,26/ 2	3,95/ 1	3,77/ 1	2,54/ 2	3,92/ 1
г) Тангенциальная сила резания, Н	1909/ 2	1968/ 2	2532/ 0	2116/ 2	2427/ 1	2747/ 0	2115/ 2
д) Постоянство толщины среза вдоль режущей кромки	да/ 1	да/ 1	нет/ 0	да/ 1	да/ 1	нет/ 0	да/ 1
Суммарное количество баллов	3	7	3	6	6	3	6

Примечание: после знака "j" указана балльная оценка пластины по соответствующему критерию

Таблица 3 – Форма стружки при точении резьбы М100х4 различными пластинами

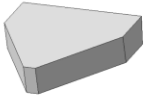

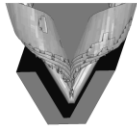
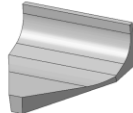


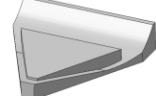
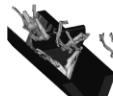

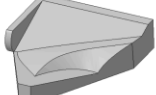
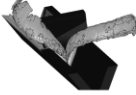

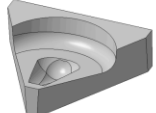
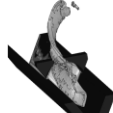

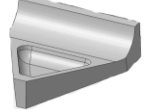
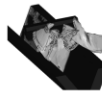

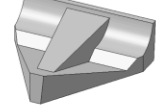
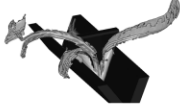

Пластина	Геометрическая модель режущей части пластины	Форма стружки при нарезании резьбы	Образование стружки при нарезании резьбы
1. ГОСТ 22398-82 Код 11150			
2. MITSUBISHI Код MMT 22ERN60			
3. TaeguTec Код 22ERN60			
4. Kennametal Код LT22ERNISOCB			
5. Sandvik Код R 166.0G-22VM01C400			
6. Sandvik Код R 166.0G-22VM01-400			
7. LMT Код B22ER4.0ISO			

Таблица 4 – Сравнение резбовых пластин с точки зрения эффективности стружкообразования

Характеристика	Пластина						
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Обозначение	11150	MMT22E RN60	22ERN60	LT22ERNI SOCB	R166.0G- 22VMO1C 400	R166.0G- 22VMO1- 400	B22ER4.0 ISO
Производитель	ГОСТ 22398-82	МITSUBISHI	TaeguTec	Kenametal	SANDVIK	SANDVIK	LMT
а) Форма стружки в поперечном сечении	плоская/ 0	плоская/ 0	плоская/ 0	выпуклая/ 2	выпуклая/ 2	выпуклая/ 2	выпуклая/ 2
б) Форма в продольном сечении	спираль/ 1	спираль/ 1	короткие элементы /2	лента/ 0	лента/ 0	лента/ 0	лента/ 0
в) Разделение потоков стружки от режущих кромок	Нет/ 0	Нет/ 0	На 3/ 2	На 2/ 1	На 2/ 1	На 3/ 2	На 3/ 2
г) Тангенциальная сила резания, Н	490/ 2	700/ 1	500/ 2	650/ 1	580/ 2	1210/ 0	1050/ 0
Суммарное количество баллов	3	2	6	4	5	4	4

Примечание. После знака «/» указана балльная оценка пластины по соответствующему критерию

Пластина №3 имеет выступ вдоль всего контура режущей кромки и это обеспечивает эффективное стружколомение и формирование частиц стружек относительно небольшого размера, при этом сила резания также близка к минимальной. Пластины №4 и №5 имеют такие выступы на передней поверхности, которые разделяют стружи, образующиеся на режущих кромках на потоки, направленные в разные стороны. Однако за счет этого несколько увеличивается сила резания. Пластины №6 и №7 разделяют стружку на 3 потока: от двух боковых режущих кромок и от кромки, их сопрягающей. Однако сила резания при обработке этими пластинами более, чем в 2 раза больше, силы резания, имеющей место при резании пластинами №1 и №3.

Для комплексного сравнения резбовых пластин с точки зрения эффективности стружкообразования предложена система из четырех критериев (табл. 4), которая отражает необходимые требования к условиям реализации процесса резбонарезания. Оценка для всех критериев (*a-z*) производилась по 3-х бальной шкале. Баллы по критерию *a* предложено назначать, исходя из формы стружки: плоская – 0 баллов, так как такая форма не способствует плотной упаковке стружки; вогнутая –1 балл, так как такая форма способствует упаковке стружки лишь в некоторой степени; выпуклая –2 балла, так как такая форма способствует упаковке стружки в большой степени. Баллы по критерию *б* назначались исходя из степени деформации стружки: чем больше деформирована стружка и меньше ее элементы, тем больше балл. Баллы по критерию *в* назначались исходя из степени разделения потоков: чем сильнее разделены потоки, тем легче происходит стружкообразование и, следовательно, больше балл. Баллы по критерию *г* назначались исходя из величины силы резания: чем меньше сила резания, тем, при прочих равных условиях, легче происходит процесс формирования стружки и, следовательно, больше балл.

Анализ полученных результатов (таб. 4) показывает, что первое и второе места по суммарному количеству баллов заняли пластины №3 и №5 за счет формирования соответственно стружки из мелких элементов и стружки, способной к относительно неплохой упаковке. Дополнительным преимуществом этих пластин является малая сила резания. Следует отметить, что в данном рейтинге пластина №2 (MMT22ERN60) оказалась на последнем месте, оказавшись даже хуже пластины №1 (11150), из-за формирования спиральной стружки при достаточно большой силе резания. Остальные пластины обеспечивают примерно одинаковое качество стружкообразования. Таким образом, для рассмотренных условий нарезания резьбы могут быть рекомендованы пластины №3 (22ERN60) и №5 (R166.0G-22VMOIC400).

Выводы

По результатам проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы.

1. В работе разработаны методом конечных элементов имитационные модели процессов нарезания глубоких канавок и резьбы с применением инструментов со сменными неперетачиваемыми пластинами различных производителей. Для 7 канавочных пластин и 7 резьбовых пластин спрогнозированы форма и размеры стружки и сила резания для случая резания стали 45 с режимами резания, которые рекомендуются производителями инструментов.

2. Для выполнения формального сравнения эффективности исследуемых пластин разработана система критериев и комплексная (бальная) оценочная система, принимающая во внимание форму стружки в различных сечениях и ее постоянство в процессе резания, ширину и толщину стружки, а также силу резания. Заключение об эффективности пластин выполнялось по сумме баллов по каждому критерию. Применяя разработанный подход определены наиболее эффективные канавочная и резьбовая пластины для рассмотренного случая.

Таким образом, представленный подход позволяет методами имитационного моделирования из всех существующих на рынке предложений выбрать для заданных условий наилучшие варианты режущего инструмента без проведения натурных экспериментов, что существенно снижает затраты на подготовку и освоение производства. Дальнейшее совершенствование представленного подхода должно быть связано с разработкой новых, более информативных критериев и систем сравнения режущих инструментов, модернизацией имитационной модели рабочего процесса путем учета податливости технологической системы.

Список использованных источников: 1. *Криворучко Д. В., Сторчак М. Г., Залого В.А.* Моделирование процессов обработки материалов резанием/Оборудование и инструмент для профессионалов. -2009. -№4 (115). – С. 46-48. 2. Токарный инструмент, вращающийся инструмент, инструментальные системы: Общий каталог MITSUBISHI 2006-2007. -2006. 3. Сменные пластины и инструмент: каталог SANDVIK COROMANT 2000. -172 с. 4. ISKAR UP GRADE: Metric Version. -2006. –176 с. 5. KENNAMETAL universal: Katalog 5090 D ZOLL & METRISCH. -2005. 6. Metalworking cutting tools: Shop version Katalog TaeguTec 2008. 7. LMT: Каталог [Электронный ресурс]. -2007. -277 с. -Режим доступа: www.LMT-tools.com, свободный. 8. *Косилова А.Г., Мецержаков Р.К.* Справочник технолога машиностроителя. – М.:Машиностроение, 1985. –Т.2. –496с. 9. ГОСТ 17163-90. Пластины твердосплавные напаиваемые типа 13. Конструкция типоразмеры. Дата введения 01.07.93. 10. *Криворучко Д. В., Залого В.О., Корбач В.Г.* Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів: Навчальний посібник. - Суми: СумДУ, 2010. –208 с. 11. *Jaspers S. P.* Metal Cutting Mechanics and Material Behaviour. -Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1999. -173 с. 12. *Колмогоров В. Л.* Напряжение, деформация, разрушение. -Л.: Металлургия, 1970. -229с.

Поступила в редколлегию 01.03.2010